В.А.Терехов

ЗАДАЧНИК ПО ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ

Для студентов вузов

В.А.Терехов ЗАДАЧНИК ПО ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ

В. А. Терехов

ЗАДАЧНИК ПО ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ

Издание второе, переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов высших технических учебных заведений

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1983

ББК 32.852
Т35
УДК 621.384(076.1)

Рецензент: проф. В. А. Батушев

Терехов В. А.

Т35 Задачник по электронным приборам: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1983. — 280 с., ил.

В пер.: 75 к.

Книга содержит задачи и вопросы по электронным приборам. Большое число вопросов и задач включено с целью связать изучение электровакуумных и полупроводниковых приборов с простейшими радиоэлектронными схемами в различных условиях работы. В настоящее издание включено много задач по новым современным приборам. Первое издание вышло в 1971 г.

Для студентов вузов, в которых изучается радиотехника, электроника, автоматика, телемеханика, электронное приборостроение, вычислительная техника.

$Т\frac{2403000000-369}{051(01)-83}183-83$

ББК 32.852
6Ф0.3

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Изучение электронных приборов является весьма важным при подготовке радиоспециалистов, а также многих специалистов нерадиотехнического профиля. Как показывает опыт, решение достаточного числа примеров и задач существенно облегчает преодоление трудностей, возникающих при прохождении данного курса. Решение задач помогает уяснить физический смысл явлений, закрепляет в памяти формулы, прививает навыки практического применения теоретических знаний.

Настоящий задачник составлен с целью облегчить и углубить изучение электронных приборов. В нем содержатся вопросы и задачи, которые можно использовать в качестве домашних заданий, а также на практических занятиях, коллоквиумах, зачетах и экзаменах. Большое число задач и вопросов включено с целью связать изучение физики электронных приборов с их практическим использованием в радиоэлектронных схемах. При этом для развития навыков самостоятельной работы имелось в виду по мере возможности приучить учащегося делать расчеты в условиях, приближенных к практике. Поэтому во многих задачах нужные для решения данные умышленно не приводятся в тексте задач, а студенты сами должны находить их либо в приложениях к книге, либо в учебниках и учебных пособиях, либо в справочниках по электровакуумным и полупроводниковым приборам.

В основу настоящего издания положен «Задачник по электровакуумным и полупроводниковым приборам», вышедший в 1971 г.

В предлагаемой книге наибольшее место уделено вопросам и задачам по полупроводниковым приборам, значительно расширены главы, в которых рассмотрены физические процессы в электронных приборах, увеличено число задач с решениями.

Объем и содержание задачника соответствуют существующим программам курсов «Электронные приборы», «Электронные и полупроводниковые приборы», «Электрон-

ные и ионные приборы», «Физика электронных приборов» для студентов радиотехнических, электронных и инженерно-физических специальностей вузов. Задачник может быть использован также при подготовке специалистов по автоматике и телемеханике, вычислительной технике, электронному приборостроению и другим родственным специальностям.

Последовательность изложения материала соответствует типовым программам курсов, однако материал отдельных глав достаточно независим и порядок его использования может быть иным.

Диапазон постановок задач и вопросов довольно широк, и в зависимости от целей обучения и учебной специальности в книге могут быть найдены наиболее подходящие для того или иного конкретного случая задачи и вопросы.

Полезные замечания и предложения при рецензировании рукописи были сделаны проф. В. А. Батушевым.

С большой благодарностью автор отмечает тщательную и кропотливую работу по редактированию книги редактора первого издания ст. преп. Ю. И. Караванова и редактора второго издания доц. Ю. Д. Денискина.

За ценные советы и дружескую помощь автор искренне благодарен проф. И. П. Жеребцову и канд. хим. наук В. П. Сассу.

Автор будет признателен всем преподавателям и учащимся, которые пришлют свои замечания относительно желательных улучшений и исправлений сборника по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

v — скорость;
v_0 — начальная скорость;
$v_к$ — конечная скорость;
a — ускорение;
m — масса электрона;
e — заряд электрона;
t — время;

T { — период;
— температура;

B — индукция магнитного поля;
φ — работа выхода;
$\varphi_к$ — контактная разность потенциалов;
d — расстояние между отклоняющими пластинами в электронно-лучевых приборах;
τ_n — время жизни электронов;
τ_p — время жизни дырок;
ω — угловая скорость;
r — радиус;
$r_{ак}$, $r_{ск}$, $r_{са}$ — расстояние анод — катод, сетка — катод, сетка — анод;

h { — шаг винтовой линии;
— постоянная Планка;
— отклонение луча на экране (из исходного положения);

h' — чувствительность электростатической трубки к отклонению;
$h'_в$ ($h'_г$) — чувствительность к вертикальному (горизонтальному) отклонению;
$h'_м$ — чувствительность магнитной трубки;

l { — расстояние;
— длина отклоняющих пластин;
— длина линии на экране;

L — расстояние от середины пластин до экрана;
c — скорость света;
Φ — световой поток;
U — потенциал, разность потенциалов (напряжение);
U_0 — потенциал в начальной точке;
$U_{ст}$ — напряжение стабилизации;
$U_к$ — потенциал в конечной точке;
$U_а$ — напряжение на аноде;

U_{ma} — амплитуда переменной составляющей напряжения на аноде;
U_{a0} — постоянная составляющая напряжения анода;
U_c — напряжение сетки;
$U_{c1}(U_{c2})$ — напряжение первой (второй) сетки;
$U_{c.зап}$ — напряжение запирания триода;
$U_{c1\,зап}$ — напряжение запирания тетрода;
$U_н$ — напряжение накала;
$U_д$ — действующее напряжение;
U_R — напряжение на нагрузке;
U_{mR} — амплитуда переменного напряжения на нагрузке;
U_{a2} — напряжение на втором аноде (ускоряющее);
$U_y(U_x)$ — напряжение, подведенное к вертикальным (горизонтальным) пластинам;
$U_э$ — напряжение эмиттера;
$U_Б$ — напряжение базы;
$U_К$ — напряжение коллектора;
$U_{КБ}$ — напряжение коллектор — база;
$U_{КЭ}$ — напряжение коллектор — эмиттер;
$U_{ЭБ}$ — напряжение эмиттер — база;
U_0 — остаточное напряжение;
$U_м$ — напряжение модулятора;
$U_{см}$ — напряжение смещения;
$U_з$ — напряжение зажигания;
E { — напряженность электрического поля; напряжение источника;
E_a — напряжение источника анодной цепи;
E_0 — среднее значение напряжения источника;
$E_К$, $E_Б$ — напряжение источника в цепи коллектора, базы;
$E_н$ — напряжение источника цепи накала;
I — ток;
I_a — анодный ток;
I_{a0} — ток покоя;
I_{ma} — амплитуда переменной составляющей анодного тока;
$I_{пр}$ — прямой ток;
$I_{обр}$ — обратный ток;
I_0 — обратный ток насыщения;
$I_Э$ — ток эмиттера;
$I_э$ — ток эмиссии катода;
$I_Б$ — ток базы;
$I_К$ — ток коллектора;
$I_к$ — ток катода;
$I'_э$ — удельная эмиссия;
$I_н$ { — ток накала; — ток в нагрузке;
I_0 — среднее значение тока в стабилитроне в режиме нормального катодного падения;

$j_{нас}$ — плотность тока насыщения;
R_0 — сопротивление постоянному току;
$R_{0.пр}(R_{0.обр})$ — сопротивление постоянному току в прямом и обратном направлении;
R_i — внутреннее сопротивление (переменному току);
$r_{диф.пр}$, $r_{диф.обр}$ — дифференциальное сопротивление при прямом и обратном напряжениях;
$R_н$ — сопротивление нагрузки;
$R_к$ — сопротивление резистора в цепи автоматического смещения;
$R_{огр}$ — ограничительное сопротивление;
P — мощность;
$P_а$ — мощность, рассеиваемая анодом;
$P_н$ — мощность накала;
$P'_н$ — удельная мощность накала;
P_{ma} — выходная мощность;
P_R — мощность, выделяемая в нагрузке;
S — крутизна статической характеристики;
$S_{раб}$ — крутизна рабочей характеристики (рабочая крутизна);
$П$ — площадь катода, p-n-перехода;
μ — статический коэффициент усиления лампы;
D — проницаемость;
K — коэффициент усиления каскада;
k { — коэффициент токораспределения; — постоянная Больцмана;
$k_в$ — коэффициент выпрямления;
k_0 — интегральная чувствительность фотоэлемента;
K_i — коэффициент усиления по току в рабочем режиме;
z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22} — параметры сопротивления разомкнутой цепи;
g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22} — параметры проводимости короткозамкнутой цепи;
h_{11} — входное сопротивление транзистора в режиме короткого замыкания на выходе для переменного тока;
h_{12} — коэффициент обратной связи в транзисторе при холостом ходе на входе для переменного тока;
h_{21} — коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе для переменного тока;
h_{22} — выходная проводимость при холостом ходе на входе для переменного тока;
$r_б$ — сопротивление базы транзистора;
$r_э$ — дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;
$r_к$ — дифференциальное сопротивление коллекторного перехода;
F — сила;
H — эффективность катода;
n { — количество электронов, попадающих ежесекундно на анод; — число оборотов в секунду; — концентрация электронов, обозначение n-области полупроводника;

p — концентрация дырок, обозначение p-области полупроводника;
D_p — коэффициент диффузии дырок;
D_n — коэффициент диффузии электронов;
μ_n — подвижность электронов;
μ_p — подвижность дырок;
L_n — длина диффузионного смещения электронов;
L_p — длина диффузионного смещения дырок;
f — частота;
$f_р$ — частота развертки (пилообразное напряжение);
ν — частота светового потока;
λ — длина волны;
α — угол; — коэффициент нагрузки;
α, α_I — интегральные коэффициент передачи тока эмиттера и инверсный коэффициент передачи тока коллектора;
β, β_0 — дифференциальные коэффициент передачи тока базы и коэффициент передачи тока базы на НЧ;
γ — эффективность эмиттера (коэффициент инжекции);
$\mu_{эк}$ — коэффициент обратной связи;
τ — время жизни неосновных носителей заряда в базе;
ω, $\omega_{гр}$ — частота, граничная частота;
E_g — ширина запрещенной зоны;
$F(E)$ — функция распределения Ферми — Дирака;
M — коэффициент умножения ударной ионизации в p- n-переходе;
$T_к$ — температура корпуса транзистора;
T_{max} — максимально допустимая температура перехода;
$U_{проб}$ — напряжение пробоя;
$I_{э\,max}$, $I_{к\,max}$ — максимально допустимый ток эмиттера, коллектора;
ε — относительная диэлектрическая проницаемость;
ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;
$w_б$, $w_э$ — ширина базы, эмиттера;
ρ — удельное сопротивление полупроводника, плотность объемного заряда;
ρ_i — удельное сопротивление собственного полупроводника;
ρ_p, ρ_n — удельное сопротивление полупроводника p- и n-типа;
σ — удельная проводимость полупроводника; — коэффициент вторичной эмиссии;
$\tau_д$ — время пролета носителей от эмиттера к коллектору;
a — половина начальной ширины канала полевого транзистора;
E_c, E_v — нижний энергетический уровень зоны проводимости и верхний энергетический уровень валентной зоны;

E_i — середина запрещенной зоны;
E_F — уровень Ферми;
$I_С$, $I_З$, $I_И$ — токи стока, затвора и истока полевого транзистора;
$I_{С\,нас}$ — ток стока в режиме насыщения;
$N_д$, $N_а$ — концентрации донорной и акцепторной примесей;
$U_{ЗИ}$, $U_{СИ}$ — напряжение затвор — исток, сток — исток;
$U_{СИ\,нас}$ — напряжение насыщения;
Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22} — Y-параметры транзистора в схеме с общим истоком;
$Y_{11б}$, $Y_{11э}$, $Y_{21к}$ — Y-параметры в схемах с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором;
$C_{эб}$, $C_{кб}$ — барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов;
$C_{эд}$, $C_{кд}$ — диффузионные емкости эмиттерного и коллекторного переходов;
$f_{гр}$ — граничная частота усиления транзистора по току;
$f_{h_{21б}}$, $f_{h_{21э}}$ — предельная частота усиления транзистора в схеме с общей базой и с общим эмиттером соответственно;
I_1, I_2 — электрические токи на входе и выходе соответственно;
$I_{БЭХ}$ — ток базы при заданных обратных напряжениях коллектор — эмиттер и эмиттер — база;
$I_{КБО}$, $I_{ЭБО}$, $I_{КЭК}$, $I_{КЭО}$ — обратные токи переходов;
$i^2_{шбк}$, $i^2_{шэб}$, $i^2_{шэк}$, $i^2_{ши}$ — среднеквадратические значения шумовых токов;
M — коэффициент усиления фотоэлектронного умножителя;
$U_{х.х}$ — напряжение холостого хода, фото-ЭДС;
$\nu_{кр}$ — частота света, соответствующая порогу фотоэффекта;
$I_{ст}$, $I_{ст\,min}$, $I_{ст\,max}$ — токи стабилитрона;
K_i, K_U, K_P — коэффициенты усиления по току, по напряжению, по мощности.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Материал сборника составлен так, чтобы он способствовал углублению и закреплению теоретических знаний, а также вырабатывал навык в решении практических вопросов и задач.

Прежде чем решать задачу или ответить на вопрос, надо понять их сущность, смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу.

Очень полезно начертить схему, относящуюся к задаче или вопросу, и по этой схеме разобраться в том, где и как

протекают токи, где и какие имеются напряжения, каковы сопротивления отдельных участков цепи. В некоторых случаях полезно начертить схему замещения. При вычерчивании схем надо пользоваться стандартными изображениями элементов этих цепей.

Решение ряда задач выполняется с помощью характеристик электровакуумных или полупроводниковых приборов; их следует перечертить из справочника на миллиметровую или клетчатую бумагу в удобном, не слишком мелком масштабе. По ГОСТ допускаются следующие масштабные соотношения: 1 : 1; 1 : 2; 1 : 2,5; 1 : 10; 1 : 20.

На осях координат обязательно надо показать, какие величины отложены и в каких единицах. Вдоль оси указывают значения этих величин в равномерном масштабе, например 10, 20, 30 и т. д. Частные значения этих величин, соответствующие отдельным точкам кривой, на осях указывать не следует.

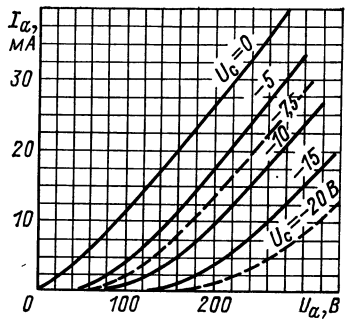


Рис. В.1.

Не рекомендуется пользоваться лекалом при вычерчивании характеристик. Надо научиться строить их от руки.

Поскольку решения, связанные с графическими построениями на характеристиках, как правило, получаются приближенными, то они могут несколько не совпадать с ответами, приведенными в конце сборника. Расхождение в ответах может быть также потому, что в различных справочниках характеристики для одного и того же прибора могут несколько отличаться друг от друга.

Нередко бывает так, что, помимо характеристик, приведенных в справочнике, для решения нужны еще характеристики для каких-либо промежуточных значений напряжений, а иногда и для напряжений, лежащих за пределами имеющихся характеристик. Тогда, используя метод линейной интерполяции или экстраполяции (метод пропорционального деления), следует построить необходимые дополнительные характеристики. На рис. В.1 пунктирными линиями показаны такие характеристики для напряжений сетки — 7,5 и —20 В.

Все аналитические решения следует производить по общеизвестным правилам. Сначала надо написать исходные формулы, сделать, если это нужно, соответствующие пре-

образования, получить конечные формулы, а затем подставить в эти формулы числовые значения и вычислить результат. Однако, если решение задач в общем виде связано с громоздкими выражениями, то его можно производить непосредственно в числах.

Ход всех преобразований и вычислений должен быть четко показан в решении задачи. Вычисления, как правило, достаточно делать с точностью до третьего знака, а в ряде случаев до второго. Нет никакого смысла доводить точность решения до четвертого или пятого знака, так как исходные данные обычно бывают известны с меньшей точностью. Например, характеристики и параметры электровакуумных и полупроводниковых приборов, емкости конденсаторов, сопротивления резисторов всегда известны с точностью, редко превышающей 5—10%.

При решении задач очень полезно пользоваться некоторыми приемами приближенных вычислений и простыми правилами, упрощающими вычисления.

Если необходимо определить полное сопротивление цепи по формуле $Z=\sqrt{R^2+X^2}$, то в тех случаях, когда $R\leqslant 0{,}1X$ или $X\leqslant 0{,}1R$, можно пренебречь меньшим сопротивлением и считать, что Z равно только одному бо́льшему сопротивлению, т. е. соответственно $Z\approx X$ или $Z\approx R$. При этом погрешность будет не более 0,5%. Например, если $R=1$ Ом и $X=10$ Ом, то $Z=\sqrt{1^2+10^2}=10{,}05$ Ом≈ 10 Ом. Отбрасывая 0,05 Ом, получаем результат с погрешностью 0,5%.

Аналогично при параллельном соединении активной $1/R$ и реактивной $1/X$ проводимостей при вычислении полной проводимости можно пренебречь меньшей, если $1/R\leqslant 0{,}1\cdot 1/X$ или $1/X\leqslant 0{,}1\cdot 1/R$, и считать соответственно, что $1/Z\approx 1/X$ или $1/Z\approx 1/R$. Другими словами, при параллельном соединении можно пренебречь большими сопротивлениями, т. е. если $R\geqslant 10\ X$ или $X\geqslant 10\ R$, то приближенно $Z\approx X$ или $Z\approx R$.

Следует пользоваться известными формулами приближенных вычислений, справедливыми при $\alpha\ll 1$ и $\beta\ll 1$. Приведем некоторые из них:

$$(1\pm\alpha)(1\pm\beta)\approx 1\pm\alpha\pm\beta;\quad (1\pm\alpha)^2\approx 1\pm 2\alpha;$$

$$(1\pm\alpha)^3\approx 1\pm 3\alpha;\quad \sqrt{1\pm\alpha}\approx 1\pm\alpha/2;\quad 1/(1\pm\alpha)\approx 1\mp\alpha.$$

Полученное в виде числового ответа решение надо всегда стараться проверить каким-либо способом. Иногда в вычислениях бывает допущена ошибка, и порядок величин в ответе получается неправильным. Полезно оценить ре-

зультат, вычислив его весьма приближенно путем округления значений, с которыми производятся действия, до удобных для вычисления.

Необходимо внимательно следить за размерностью величин и не допускать таких грубых ошибок, как, например, получение сопротивления в омах при делении по закону Ома напряжения в вольтах на ток в миллиамперах. При таком делении сопротивление получается в килоомах. А если ток в миллиамперах умножить на сопротивление в килоомах, то падение напряжения получается в вольтах. Эти правила удобны в расчетах, так как токи в цепях электронных приборов обычно выражаются в миллиамперах.

Подобно этому, если вольты делить на микроамперы, то сопротивление получается в мегаомах. А если, например, милливольты делить на миллиамперы, то сопротивление будет выражаться в омах.

Некоторые задачи можно решить несколькими методами. Очень полезно проверить различные методы решения. Помимо того, что это дает дополнительную тренировку, сопоставив решения, можно сделать вывод о том, какие методы решения являются наиболее рациональными. Всегда следует считать лучшим тот метод решения, который проще, т. е. требует меньшего числа действий.

При пользовании справочниками по электровакуумным и полупроводниковым приборам надо иметь в виду, что приводимые в них такие параметры, как крутизна S, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ электронных ламп, а также h-параметры транзисторов, относятся к тому режиму, который приведен в справочнике в качестве рекомендуемого, т. е. к определенной точке характеристик. Для других режимов параметры будут иными. Для каждого режима в случае необходимости надо находить параметры из характеристик или путем измерений.

Ответы на вопросы рекомендуется обязательно писать в своей рабочей тетради. Их следует давать по возможности кратко, но вместе с тем достаточно ясно и точно.

Часть первая

ЗАДАЧИ

Глава первая

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ[1]

1.1. Электрон ускоряется разностью потенциалов 1 В. Начальная скорость электрона равна нулю. Определить конечную скорость электрона и его кинетическую энергию.

1.2. Доказать, что время пролета электрона в секундах между пластинами плоскопараллельного конденсатора $t=\frac{2d}{5{,}93\cdot10^5\sqrt{U}}$, где U — разность потенциалов между пластинами, В; d — расстояние между пластинами, м. Считать, что начальная скорость электронов равна нулю.

1.3. Расстояние между анодом и катодом плоскопараллельного диода $d=4$ мм, напряжение анода $U_a=20$ В, анодный ток $I_a=10$ мА. Требуется определить: а) число электронов, попадающих ежесекундно на анод; б) скорость электронов в момент удара об анод; в) силу, действующую на электрон в пространстве между анодом и катодом; г) время пролета электрона от катода до анода. Считать, что электроны покидают катод с нулевой начальной скоростью.

Решение. 1. Используя соотношение $I=ent$, определим число электронов, попадающих ежесекундно на анод:

$$n=\frac{I}{e}=\frac{15\cdot10^{-3}}{1{,}6\cdot10^{-19}}=6{,}25\cdot10^{16}.$$

2. Скорость электронов в момент удара об анод

$$v=\sqrt{2\frac{e}{m}U_a}=\sqrt{\frac{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot20}{9{,}1\cdot10^{-31}}}=2{,}65\cdot10^6\ \text{м/с}.$$

3. Сила, действующая на электрон в пространстве между анодом и катодом, $F=-eE$ (отрицательный знак указывает, что сила действует

[1] Везде, где это специально не оговорено, подразумевается движение заряженных частиц в однородном поле и вакууме.

в направлении, противоположном вектору напряженности электрического поля);

$$|F| = eE = e\frac{U_a}{d} = \frac{1,6\cdot10^{-19}\cdot20}{4\cdot10^{-3}} = 8\cdot10^{-16}\,\text{Н}.$$

4. Время пролета электрона от катода до анода вычислим из соотношения

$$y=d=at^2/2,$$

откуда

$$t=\sqrt{2\frac{d}{a}}.$$

Неизвестное ускорение a найдем из следующих соображений.

В электрическом поле на электрон действует сила $|F|=eE$. Однако согласно второму закону Ньютона эта сила $F=ma$. Следовательно, $eE=ma$, откуда $a=eE/m=eU_a/(md)$.

Таким образом, время пролета

$$t=\sqrt{2\frac{d^2m}{eU_a}}=\sqrt{\frac{2(4\cdot10^{-3})^2\cdot9,1\cdot10^{-31}}{1,6\cdot10^{-19}\cdot20}}=3\cdot10^{-9}\text{ с}.$$

1.4. Две пластины, напряжение между которыми 2000 В, удалены друг от друга на расстояние 3 см. Электрон начинает двигаться от отрицательно заряженной пластины с начальной скоростью, равной нулю. Определить: а) через какое время электрон достигнет скорости 10^7 м/с; б) какой путь он пролетит, прежде чем достигнет такой скорости; в) какой разности потенциалов соответствует эта скорость; г) на сколько увеличится кинетическая энергия электрона в конце пути?

1.5. Электроны летят от катода к аноду с начальной скоростью $4\cdot10^6$ м/с. Определить потенциал анода, при котором электроны не смогут попасть на него (потенциал катода считать равным нулю).

1.6. Между плоскопараллельными пластинами A и B, расположенными друг от друга на расстоянии d, действует разность потенциалов U (рис. 1.1). Электрон в момент времени $t=0$ вылетает из точки 0 со скоростью v_0 вдоль оси x. Определить: а) скорость v и расстояние x, которое электрон пролетает в зависимости от времени; б) время пролета электрона между пластинами; в) при какой разности потенциалов электрон сможет пройти только половину расстояния между электродами. Рассмотреть случаи как ускоряющей, так и замедляющей разности потенциалов.

1.7. Три металлические пластины A, B и C расположены параллельно друг к другу (рис. 1.2). В пластине B имеется отверстие (потенциал в отверстии принять равным потенциалу пластины и пренебречь краевыми эффектами). Электрон, начиная движение от пластины A, через отверстие в пластине B попадает на пластину C. Определить время пролета электрона от пластины A до отверстия и от отвер-

стия до пластины C. Определить также скорость, с которой электрон пролетает через отверстие и с которой он ударяется о пластину C, если: а) пластины равноудалены друг от друга на расстояние 1 см, их потенциалы равны соответственно 0, +100 и +400 В, а начальная скорость электрона равна нулю; б) пластины равноудалены друг от друга на расстояние 2 см, их потенциалы равны соответственно 0, +100 и +300 В и электрон обладает начальной энергией 20 эВ.

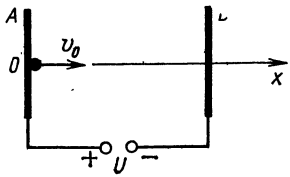


Рис. 1.1.

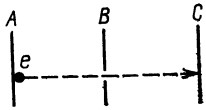


Рис. 1.2.

1.8. При каком ускоряющем напряжении масса электрона увеличится в конце пробега на 15%?

1.9. Три металлические пластины A, B и C расположены, как показано на рис. 1.3. В пластине B имеется отверстие (потенциал в отверстии принять равным потенциалу пластины и пренебречь краевыми эффектами). Пластины равноудалены друг от друга на расстоянии 1 см, и их потенциалы равны соответственно 0, 400 и −100 В. Электроны вылетают из точки 0 и движутся вдоль оси y. Найти скорость

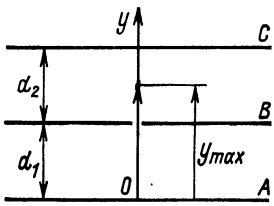


Рис. 1.3.

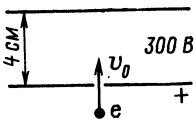


Рис. 1.4.

электронов, вылетающих из отверстия в пластине B, максимальное их удаление y_{max} от точки 0 и время, затраченное на пролет от точки 0 до y_{max}.

1.10. Электрон с начальной энергией 50 эВ начинает движение по нормали к плоскости пластин (рис. 1.4). Определить: а) на каком расстоянии от нижней пластины электрон полностью затормозится; б) через какое время электрон возвратится к нижней пластине; в) какую энергию сообщит электрон нижней пластине при возвращении; г) какова должна быть начальная энергия, чтобы электрон мог достигнуть верхней пластины?

1.11. Две параллельные металлические пластины расположены горизонтально на расстоянии 2 см одна от другой. Потенциал верхней пластины +500 В относительно нижней. Электрон с нулевой начальной скоростью летит из центра нижней пластины. Определить: а) скорость и энергию в момент удара о пластину; б) время пролета.

1.12. Как только электрон (см. задачу 1.11) пролетит расстояние 1 см, потенциал на пластинах изменит свой знак и станет равным 300 В. Определить: а) какой пластины достигнет электрон; б) конечную скорость электрона; в) общее время пролета; г) максимальную энергию электрона до изменения знака потенциала и энергию, отданную пластине.

1.13. Потенциалы катода, сетки и анода равны соответственно 0, —4, +50 В. Электрон вылетает из катода с энергией 5 эВ. Определить: а) чему будет равна кинетическая энергия этого электрона, если он достигнет сетки; б) чему будет равна его кинетическая энергия, если он достигнет анода; в) какое напряжение надо приложить к сетке, чтобы электроны с энергией 5 эВ не могли достигнуть сетки.

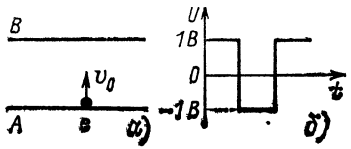


Рис. 1.5.

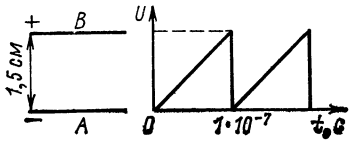


Рис. 1.6.

1.14. Электрон вылетел из катода с начальной скоростью v_0= =1000 км/с и на пути к аноду пролетел два участка: один с тормозящим полем, созданным сеткой, расположенной на расстоянии d= =1 мм от катода; второй — с ускоряющим полем, созданным анодом, расположенным на расстоянии d_2=6 мм от сетки. По отношению к катоду потенциал сетки U_c=—2 В, потенциал анода U_a=100 В. Определить энергию, которую будет иметь электрон у анода, и достаточна ли она для выбивания из анода вторичных электронов (анод никелевый). Работа выхода никеля равна 2,77 эВ.

1.15. На две плоскопараллельные пластины, расположенные на расстоянии 1 см, подается импульс напряжения прямоугольной формы с амплитудой 1 В и частотой 100 МГц (рис. 1.5,*а* и *б*). В момент времени t=0 потенциал пластины *B* равен +1 В относительно пластины *A*, поэтому электрон, находящийся у поверхности пластины *A*, получает ускорение в направлении пластины *B*. Определить: а) скорость электрона и расстояние от пластины *A* в двух случаях: в конце полупериода и в конце периода; б) на какой пластине электрон закончит свой путь?

1.16. Две плоскопараллельные пластины отстоят друг от друга на расстоянии в 1,5 см. На них подается импульс напряжения прямоуголь-

ной формы с амплитудой 1000 В, причем полярность меняется на обратную через 10^{-9} с. В момент времени $t=0$ электрон находится на пластине с меньшим потенциалом и начинает двигаться ко второй пластине. Определить: а) на какой пластине электрон закончит свой путь; б) кинетическую энергию, которую приобретает электрон за время своего ускорения.

1.17. Две плоскопараллельные пластины отстоят друг от друга на расстоянии, равном 1 см. Электрон, имеющий нулевую начальную скорость, летит от нижней пластины к верхней. С момента начала движения электрона потенциал верхней пластины начинает равномерно увеличиваться от 0 со скоростью 10^5 В/с. Покажите, что расстояние, пролетаемое электроном, будет пропорционально кубу времени от момента начала движения. Какой путь пролетит электрон через 0,1 мкс и с какой скоростью он ударится о верхнюю пластину?

1.18. Генератор прямоугольных импульсов в задаче 1.16 заменен импульсным генератором пилообразного напряжения (рис. 1.6). Определить: а) какой путь пролетит электрон за 40 нс; б) какова его скорость в конце этого пути; в) за какое время электрон достигнет пластины B и с какой скоростью. Амплитуда импульса напряжения 10 В.

Решение. Напряженность электрического поля между пластинами

$$E_x=Ut/(d\cdot10^{-7})=10t/(1{,}5\cdot10^{-2}\cdot10^{-7})=6{,}7\cdot10^{9}t,\ \text{В/м}. \qquad (1)$$

Ускорение электрона

$$a_x=\frac{dv_x}{dt}=\frac{F_x}{m}=\frac{eE_x}{m}=\frac{1{,}602\cdot10^{-19}\cdot6{,}7\cdot10^{9}t}{9{,}1\cdot10^{-31}}=1{,}18\cdot10^{21}t,\text{м/с}^2. \qquad (2)$$

Интегрируя (2) по t, при условии, что при $t=0$ $x=0$, найдем выражение для скорости:

$$v_x=\int_0^t a_x dt=at^2/2=5{,}9\cdot10^{20}t^2,\ \text{м/с}. \qquad (3)$$

При $t=40$ нс $v_x=5{,}9\cdot10^{20}(4\cdot10^{-8})^2=9{,}44\cdot10^5$ м/с.

Путь, пройденный электроном, в метрах, найдем, интегрируя (3) по t при условии, что $x=0$ при $t=0$:

$$x=s=\int_0^t v_x dt=\int_0^t 5{,}9\cdot10^{20}t^2dt=1{,}97\cdot10^{20}t^3. \qquad (4)$$

При $t=40$ нс $x=s=1{,}97\cdot10^{20}(4\cdot10^{-8})^3=0{,}013$ м$=1{,}3$ см.

Из (4) найдем время, за которое электрон достигнет верхней пластины:

$$t=\left(\frac{d}{1{,}97\cdot10^{20}}\right)^{1/3}=\left(\frac{1{,}5\cdot10^{-2}}{1{,}97\cdot10^{20}}\right)^{1/3}=4{,}24\cdot10^{-8}\ \text{с}.$$

Используя (3), определим скорость, с которой электрон подлетает к верхней пластине:

$$v=5{,}9\cdot10^{20}(4{,}24\cdot10^{-8})^2=10{,}6\cdot10^5 \text{ м/с}.$$

1.19. В трехэлектродной плоскопараллельной системе электродов (рис. 1.7) к аноду A приложено напряжение $U_a=-7$ В, к сетке C $U_c=+8$ В (по отношению к катоду). Расстояние от сетки до анода $d=5$ мм. Электрон вылетает с катода со скоростью $5{,}93\cdot10^5$ м/с. Какое расстояние от сетки в направлении анода может пролететь электрон? Каким должно быть напряжение на аноде, чтобы электрон смог достигнуть анода с нулевой скоростью? Рассчитать время нахождения электрона в пространстве сетка — анод.

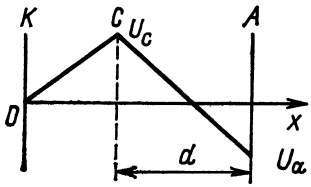


Рис. 1.7.

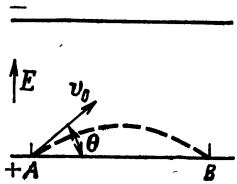


Рис. 1.8.

1.20. Электрон с начальной энергией 100 эВ влетает в однородное электрическое поле плоского конденсатора напряженностью 10^4 В/м под углом θ (рис. 1.8). Электрон достигает точки B за 4,77 нс. Найти расстояние AB и угол θ.

Решение. 1. Найдем начальную скорость электрона:

$$v_0=\sqrt{2\frac{e}{m}U}=\sqrt{\frac{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot100}{9{,}1\cdot10^{-31}}}=5{,}93\cdot10^6 \text{ м/с}.$$

2. Поскольку скорость по направлению x постоянна, то расстояние в метрах

$$x=AB=(v_0\cos\theta)t=5{,}93\cdot10^6\cos\theta\cdot4{,}77\cdot10^{-9}=2{,}83\cdot10^{-2}\cos\theta.$$

3. Таким образом, для нахождения расстояния AB нужно определить угол θ. Так как ускорение a_y в направлении оси y постоянно, то

$$y=(v_0\sin\theta)t-1/(2a_yt^2).$$

В точке B $y=0$, следовательно,

$$v_0\sin\theta=1/2a_yt=\frac{1}{2}\left(\frac{eE}{m}\right)t=$$

$$=\frac{1}{2}\left(\frac{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot10^4}{9{,}1\cdot10^{-31}}\right)\cdot4{,}77\cdot10^{-9}=4{,}2\cdot10^3 \text{ м/с}.$$

Тогда

$$\sin\theta=4{,}2\cdot10^6/(5{,}93\cdot10^6)=0{,}707, \text{ т. е. } \theta=45°.$$

Следовательно, расстояние

$$x = AB = 2{,}83 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}707 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 2 \text{ см}.$$

1.21. Электрон с начальной энергией 50 эВ в момент времени $t=0$ влетает в электрическое поле между параллельными пластинами под углом 60° к направлению, перпендикулярному пластинам. Расстояние между пластинами 1 см. Напряжение, приложенное к пластинам, изменяется по закону $U = 100e^{0{,}5 \cdot 10^9 t}$. Определить: а) время пролета электрона до верхней пластины; б) скорость и энергию электрона при ударе о верхнюю пластину.

1.22. Посередине между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью 10^6 м/с, направленной нормально к вектору напряженности электрического поля. На какой угол отклонится электрон от первоначального направления, если расстояние между пластинами $d=1{,}2$ см, длина пластин $l=5$ см и напряжение на пластинах $U=15$ В?

1.23. Электроны, образующие электронный луч, приобрели скорость под действием разности потенциалов 500 В, приложенной между источником электронов и ускоряющим анодом. Определить разность потенциалов, которую необходимо приложить между двумя отклоняющими пластинами длиной 3 см и расположенными на расстоянии 1 см друг от друга, чтобы отклонить луч на 20°.

1.24. В диоде с цилиндрическими электродами катод имеет диаметр 0,1 мм, анод — 1 см. Потенциал катода равен нулю, потенциал анода 200 В. От катода движется электрон с начальной скоростью, равной нулю. Какую скорость будет иметь электрон после прохождения расстояния 2 мм? (Наличием пространственного заряда пренебречь.)

1.25. Пучок ионов цезия проходит ускоряющую разность потенциалов 100 В и затем движется в пространстве, где поле отсутствует, пролетая расстояние 6 мм за $5 \cdot 10^{-7}$ с. Найти массу иона.

1.26. Внутри цилиндрического конденсатора движется электрон. Движение начинается с поверхности внутреннего цилиндра без начальной скорости. Какую скорость приобретает электрон, пролетев расстояние x внутри конденсатора? Радиусы обкладок R и r. Между обкладками создана ускоряющая разность потенциалов U.

1.27. Электронный луч, ускоренный разностью потенциалов 1000 В, входит в поперечное магнитное поле с индукцией $B=10^{-2}$ Тл. а) Определить радиус траектории; б) повторить вычисления для пучка протонов, если заряд протона равен $+e$, а масса в 1838 раз больше массы электрона.

1.28. Электронный луч проходит через поперечное магнитное поле, действующее на расстоянии 18 см в направлении луча. Луч входит в поле с начальной энергией 500 эВ. Индукция магнитного поля 10^{-4} Тл. Определить угол отклонения электронного луча.

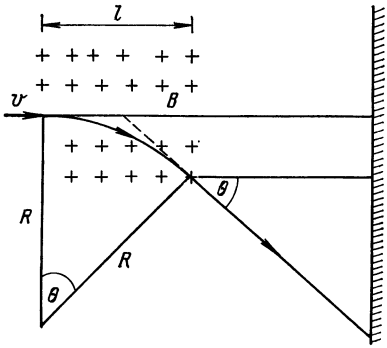


Рис. 1.9.

1.29. Электронный луч проходит через поперечное магнитное поле с индукцией $7\cdot10^{-4}$ Тл, действующее на расстоянии $l=6$ см в направлении распространения луча (рис. 1.9). Определить ускоряющее напряжение, если луч отклонился на угол $\theta=17{,}5°$.

Решение. В однородном поперечном магнитном поле электрон будет двигаться по круговой траектории, так как сила, действующая на электрон, перпендикулярна вектору скорости v и вектору магнитной индукции B. Значение этой силы

$$F=eBv. \qquad (1)$$

Поскольку заряженная частица описывает круговую траекторию с постоянной скоростью, центростремительная сила будет равна

$$F=mv^2/R, \qquad (2)$$

где R — радиус траектории.

Следовательно,

$$eBv=mv^2/R,$$

откуда радиус траектории

$$R=mv/(eB). \qquad (3)$$

Радиус траектории зависит от скорости v, с которой электрон входит в магнитное поле. Эта скорость, в свою очередь, определяется ускоряющим напряжением.

Из рис. 1.9 видно, что

$$\sin\theta=\frac{l}{R},$$

откуда

$$R=\frac{l}{\sin\theta}=\frac{0{,}06}{\sin 17{,}5°}\approx 0{,}2 \text{ см}.$$

Из (3)

$$v=\frac{RBe}{m}=\frac{0{,}2\cdot7\cdot10^{-4}\cdot1{,}602\cdot10^{-19}}{9{,}106\cdot10^{-31}}=2{,}46\cdot10^{7} \text{ м/с}.$$

Ускоряющее напряжение определим из выражения

$$v=\sqrt{2\frac{e}{m}U}.$$

Следовательно,

$$U=\frac{v^2m}{2e}=\frac{(2{,}46\cdot10^{7})^2\cdot9{,}1\cdot10^{-31}}{2\cdot1{,}602\cdot10^{-19}}=1720 \text{ В}.$$

1.30. Электронный луч, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U_a = 1600$ В, попадает в однородное поперечное магнитное поле протяженностью $l = 20$ мм в направлении первоначального распространения луча (рис. 1.10). Индукция магнитного поля $B = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ Тл. Определить направление вектора **B**, угол отклонения φ и отклонение $y_м$ электронов при выходе из магнитного поля.

1.31. Протон влетает в поперечное однородное магнитное поле, действующее на расстоянии $l = 50$ мм вдоль первоначального направления движения, и ударяется о поверхность мишени, удаленной от

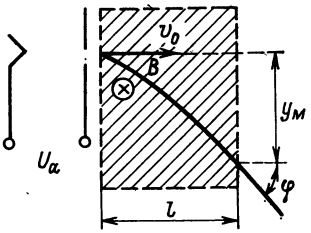


Рис. 1.10.

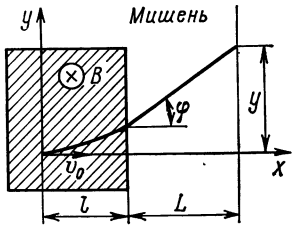


Рис. 1.11.

магнитного поля на расстояние $L = 150$ мм (рис. 1.11). Определить угол φ и отклонение y протона, если его энергия равна $1 \cdot 10^4$ эВ, а индукция магнитного поля $B = 5 \cdot 10^{-2}$ Тл.

1.32. Электронный луч проходит через область поперечного магнитного поля протяженностью 15 см в направлении распространения луча. Какой должна быть индукция магнитного поля, чтобы вызвать при выходе из магнитного поля отклонение луча на 2 см? Луч входит в поле с начальной энергией 1000 эВ.

1.33. Электрон, ускоренный электрическим полем, был направлен под прямым углом в однородное магнитное поле с индукцией $B = 10^{-3}$ Тл. Каким должно быть ускоряющее напряжение, чтобы он вращался по окружности радиусом 1 см? Сколько оборотов в секунду он совершит?

1.34. Электрон с начальной энергией 1000 эВ входит в поперечное магнитное поле с индукцией $B = 10^{-2}$ Тл. Определить: а) радиус кривизны траектории электрона; б) какой будет траектория электрона, если угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции будет составлять 5°?

1.35. Электрон влетает в точку A магнитного поля со скоростью 10^7 м/с в направлении, лежащем в плоскости страницы (рис. 1.12). Угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля $\theta = 30°$. При каком значении индукции магнитного поля электрон пролетит через точку B, если расстояние $AB = 10$ см?

1.36. Чему равно отклонение электронного луча на экране осциллографической трубки под действием магнитного поля Земли, если ось трубки перпендикулярна направлению магнитного поля. Индукцию

магнитного поля принять равной $0{,}7\cdot10^{-4}$ Тл. Ускоряющая разность потенциалов равна 625 В. Расстояние от отверстия в аноде до экрана 180 мм.

1.37. Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 1,6 кВ, влетает в поперечное однородное магнитное поле с индукцией $5\cdot10^{-3}$ Тл. Определить: а) радиус круговой орбиты электрона и период его обращения; б) параметры траектории, если электрон влетает в магнитное поле под углом 30° к силовым линиям.

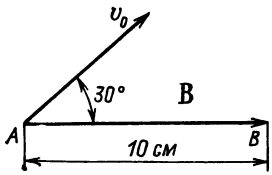


Рис. 1.12.

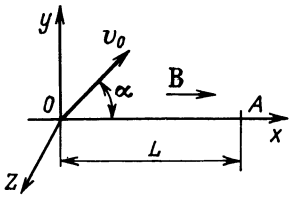


Рис. 1.13.

1.38. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле по винтовой линии, радиус которой равен 20 мм, а шаг 125,6 мм. Определить угол, который составляет вектор скорости частицы с вектором индукции магнитного поля.

1.39. Электрон с начальной скоростью $2\cdot10^7$ м/с влетает в точку 0 под углом $\alpha=45°$ к силовым линиям магнитного поля (рис. 1.13). Вектор скорости лежит в плоскости XOY. При каком наименьшем значении индукции B электрон попадает в точку A, находящуюся на расстоянии $L=15$ см от точки 0? Определить время, необходимое для этого. Нарисовать проекции траектории электрона на плоскости XOY, XOZ, YOZ.

1.40. В однородное магнитное поле с индукцией $B=5\cdot10^{-3}$ Тл влетают два электрона со скоростью $8\cdot10^6$ м/с. Вектор скорости одного из них направлен под углом 0,2 рад к вектору магнитной индукции, а второго — практически совпадает с направлением вектора магнитной индукции. Найти разницу в шаге винтовой линии для этих электронов.

1.41. В однородное магнитное поле с индукцией $B=2{,}4\cdot10^{-3}$ Тл влетает электронный пучок, имеющий в направлении вектора магнитной индукции скорость v_x, соответствующую ускоряющему напряжению 1000 В. Определить, на каком расстоянии от места, где электроны попадают в магнитное поле, пучок будет сфокусирован в одну точку.

Решение. Разложим скорость электронов v на две составляющие: продольную v_x и поперечную v_y. Поскольку продольное магнитное поле на скорость электронов никак не действует, то все электроны будут перемещаться по оси x с постоянной скоростью v_x. Но вектор магнитной индукции перпендикулярен к составляющей скорости v_y,

поэтому под действием магнитного поля электроны, летящие под различными углами, будут описывать различные окружности.

Время прохождения электронов по окружностям различных радиусов будет одинаковым, и электроны, описав разные окружности, соберутся в одну точку.

Действительно, сила действия магнитного поля на электрон, движущийся со скоростью v_y, является центростремительной силой, поэтому

$$Bev_y = mv^2_y/R,$$

откуда $v_y = BeR/m$, а время $t = 2\pi R/v_y = 2\pi m/(Be)$, т. е. время движения электрона по окружности не зависит ни от скорости электрона, ни от радиуса окружности, по которой он движется. Расстояние, на котором будут сфокусированы электроны, $x = v_x t$. Подставляя значения величин, данные в условии задачи, получаем:

$$x = \sqrt{2\frac{e}{m}U}\,\frac{2\pi m}{Be} = \frac{2\pi}{B}\sqrt{\frac{2mU}{e}} =$$

$$= \frac{2\cdot 3{,}14}{2{,}4\cdot 10^{-3}}\sqrt{\frac{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 1000}{1{,}6\cdot 10^{-19}}} = 0{,}28 \text{ м} = 28 \text{ см}.$$

1.42. Электрон с начальной энергией 1000 эВ входит в поперечное электрическое поле посредине между двумя плоскопараллельными пластинами (рис. 1.14), расстояние между которыми равно 1 см. Определить расстояние x, на котором электрон ударится о пластину. Какова должна быть индукция B магнитного поля, чтобы препятствовать отклонению электрона между пластинами?

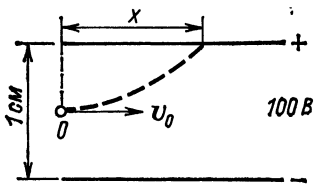


Рис. 1.14.

1.43. К двум плоскопараллельным пластинам длиной 6 см и удаленным друг от друга на 2 см приложено напряжение 300 В. Электрон отклоняется на выходе из этой системы на 5,37 мм. Отклонение электрона будет равно нулю, если одновременно с электрическим полем между пластинами действует поперечное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}5\cdot 10^{-3}$ Тл. Не пользуясь электронными константами, определить: а) скорость электрона; б) отношение заряда электрона к его массе.

1.44. Пучок ионов неона, проходя через взаимно перпендикулярные пространственно совмещенные однородные электрическое и магнитное поля, движется прямолинейно. Напряженность электрического поля $E = 5\cdot 10^4$ В/м, магнитная индукция $B = 2{,}5\cdot 10^{-2}$ Тл. Определить кинетическую энергию иона. Атомная масса неона равна 20.

1.45. В плоскопараллельном диоде расстояние между анодом и катодом 6 мм. Магнитное поле с индукцией $1{,}5\cdot 10^{-2}$ Тл направлено

перпендикулярно движению электронов. Определить минимальное значение анодного напряжения U_a, при котором начнется прохождение тока через диод.

1.46. В некоторой области действует электрическое поле с напряженностью $E=10^3$ В/м, параллельное, но противоположное магнитному полю с индукцией $B=0{,}7\cdot10^{-3}$ Тл. Электрон со скоростью $v_0=5\cdot10^6$ м/с влетает в эту область под углом $\varphi=30°$ к вектору напряженности электрического поля (рис. 1.15,*а*).

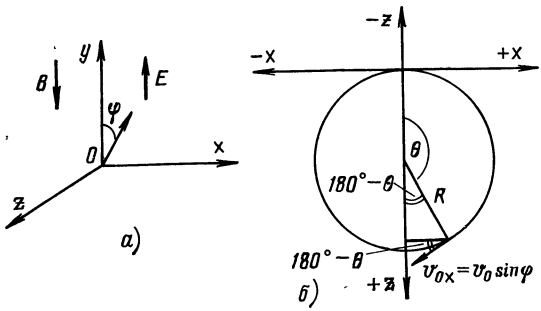


Рис. 1.15.

Определить: а) время, необходимое для достижения электроном максимальной высоты в плоскости *xz*; б) положение электрона за это время; в) составляющие скорости электрона за это время.

Решение. 1. Выбранная система координат показана на рис. 1.15,*а*. В этой системе координат

$$y=v_0t-1/(2at^2) \quad \text{и} \quad v_y=v_{0y}-at.$$

Электрон начинает свое движение в положительном направлении координаты *y*. Но так как ускорение отрицательно, скорость электрона уменьшится до нуля за время $t=t'$. Затем электрон будет двигаться в обратном направлении. Когда электрон достигнет максимальной высоты, его составляющая скорости $v_y=0$ и время $t'=v_{0y}/a$.

Нормальная составляющая скорости

$$v_{0y}=v_0\cos\varphi=5\cdot10^6\cos30°=5\cdot10^6\cdot0{,}87=4{,}3\cdot10^6 \text{ м/с}.$$

Ускорение

$$a_y=eE/m=1{,}602\cdot10^{-19}\cdot10^3/(9{,}1\cdot10^{-31})=1{,}76\cdot10^{14} \text{ м/с}^2.$$

Время достижения электроном максимальной высоты в плоскости *xz* равно:

$$t=t'=v_{0y}/a=4{,}3\cdot10^6/(1{,}76\cdot10^{14})=2{,}4\cdot10^{-8} \text{ с}.$$

2. Максимальная высота подъема, при достижении которой электрон начнет обратное движение, равна

$$y=v_{0y}t-at^2/2=4{,}3\cdot10^6\cdot2{,}4\cdot10^{-8}-$$
$$-(1/2)\cdot1{,}76\cdot10^{14}(2{,}4\cdot10^{-8})^2=5{,}22\cdot10^{-2}=5{,}22 \text{ см.}$$

Под действием магнитного поля электрон будет совершать движение по окружности.

Угловая скорость равна

$$\omega=eB/m=1{,}76\cdot10^{11}\cdot7\cdot10^{-4}=1{,}23\cdot10^8 \text{ рад/с.}$$

Период обращения электрона

$$T=2\pi/\omega=2\pi/(1{,}23\cdot10^8)=5{,}1\cdot10^{-8} \text{ с,}$$

т. е. электрон не совершит полного оборота за время t.

Следовательно, угол поворота (рис. 1.15,*б*)

$$\theta=\omega t=1{,}23\cdot10^8\cdot2{,}4\cdot10^{-8}=2{,}95 \text{ рад}=169°.$$

Радиус кривизны траектории электрона

$$R=\frac{v_{0x}}{\omega}=\frac{v_0\sin\varphi}{\omega}=\frac{5\cdot10^6\cdot0{,}6}{1{,}23\cdot10^8}=2{,}03 \text{ см.}$$

Электрон будет иметь следующие координаты (рис. 1.15,*б*):

$$x=R\sin(180°-\theta)=2{,}03\sin 11°=2{,}03\cdot0{,}19=0{,}387 \text{ см;}$$
$$z=R+R\cos(180°-\theta)=2{,}03+2{,}03\cos 11°=2{,}03+2{,}03\cdot0{,}98=4{,}02 \text{ см.}$$

Траектория движения электрона — винтовая линия.

3. Поскольку тангенциальная составляющая скорости $v_{0x}=$ $=v_0\sin\varphi=5\cdot10^6\cdot0{,}5=2{,}5\cdot10^6$ м/с, то составляющие скорости v_x, v_y и v_z будут равны:

$$v_x=-v_{0x}\cos(180°-\theta)=-2{,}5\cdot10^6\cos 11°=$$
$$=-2{,}5\cdot10^6\cdot0{,}98=-2{,}45\cdot10^6 \text{ м/с;}$$
$$v_z=v_{0x}\sin(180°-\theta)=2{,}5\cdot10^6\sin 11°=$$
$$=2{,}5\cdot10^6\cdot0{,}19=4{,}75\cdot10^5 \text{ м/с;}$$
$$v_y=0.$$

1.47. Магнитное поле с индукцией B и электрическое поле с напряженностью E направлены под углом 90° друг к другу. Определить вид траектории электрона, который начинает движение из начала координат *0*.

1.48. В электронно-лучевой трубке действуют магнитное поле с индукцией $B=0{,}01$ Тл вдоль оси и электрическое поле с напряженностью $E=10^4$ В/м, подводимое к отклоняющим пластинам. Определить, на каком расстоянии от оси электронно-лучевой трубки будет электрон, пролетевший между отклоняющими пластинами, если он вы-

летел с начальной скоростью 10^6 м/с, направленной вдоль оси трубки. Длина отклоняющих пластин равна 2 см.

Решение. Выбранная система координат показана на рис. 1.16. Следовательно,

$$v_{0x}=v_{0z}=0 \text{ и } v_{0y}=10^6 \text{ м/с}.$$

Электрон будет двигаться по циклоиде в плоскости xz с постоянной скоростью вдоль оси x.

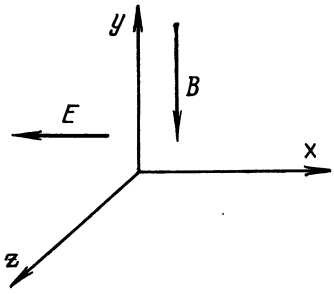


Рис. 1.16.

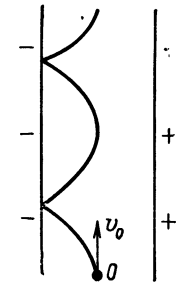


Рис. 1.17.

В области между пластинами электрон будет находиться время

$$t=\frac{l}{v_{0y}}=\frac{2\cdot10^{-2}}{10^6}=2\cdot10^{-8} \text{ с}.$$

Угловая скорость равна

$$\omega=\frac{eB}{m}=\frac{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot10^{-2}}{9{,}1\cdot10^{-31}}=1{,}76\cdot10^9 \text{ рад/с}.$$

Переносная скорость равна

$$u=E/B=\frac{10^4}{10^{-2}}=10^6 \text{ м/с}.$$

Угловое перемещение

$$Q=\frac{u}{\omega}=\frac{10^6}{1{,}76\cdot10^9}=5{,}68\cdot10^{-4} \text{ м}.$$

Угол поворота

$$\theta=\omega t=1{,}76\cdot10^9\cdot2\cdot10^{-8}=35{,}2 \text{ рад}.$$

Но 35,2 рад=10π+3,8 рад. Так как 3,8 рад=218°, то

$$x=Q(1-\cos\theta)=0{,}0568(1-\cos 218°)=0{,}103 \text{ см}$$

и

$$Z=Q(\theta-\sin\theta)=0{,}0568(35{,}2-\sin 218^\circ)=2{,}03 \text{ см}.$$

Следовательно, расстояние от оси трубки

$$r=\sqrt{x^2+z^2}=\sqrt{(0{,}103)^2+(2{,}03)^2}=2{,}03 \text{ см}.$$

1.49. Электрон с начальной скоростью v_0 вылетает из точки 0, расположенной посередине между пластинами плоскопараллельного конденсатора (рис. 1.17). Расстояние между пластинами равно 1 см, а приложенное напряжение 100 В. а) Найти значение и направление индукции магнитного поля, которое заставит электрон двигаться по указанной на рисунке циклоиде. Учесть, что электрон имеет нулевую скорость в точке поворота на отрицательно заряженной пластине; б) какова должна быть скорость v_0, чтобы электрон двигался по этому пути?

1.50. Покажите, что во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях положение электрона, имеющего нулевую начальную скорость, в любой момент времени описывается выражениями: $z=[E/(B\omega)](1-\cos\omega t)$; $x=[E/(B\omega)](\omega t-\sin\omega t)$, где $\omega=Be/m$; E — напряженность электрического поля; B — индукция магнитного поля; ось x направлена вдоль вектора напряженности электрического поля; ось z — по нормали к векторам **B** и **E**.

1.51. Вычислить ускоряющее напряжение, при котором масса электрона превысит его массу покоя на 1%. Рассчитать то же для протона (ядро атома водорода).

1.52. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы сила, действующая на него со стороны однородного электрического поля с напряженностью E, уравновешивалась силой тяжести. Принять $E=100$ В/м, ускорение свободного падения $g=9{,}81$ м/с^2.

1.53. Заряженная частица, движущаяся со скоростью, равной 0,8 скорости света, обладает кинетической энергией $6{,}28\cdot10^8$ эВ. Что это за частица?

1.54. Найти кинетическую энергию и импульс электрона и протона, скорость движения которых составляет 0,99 скорости света.

1.55. Электрон, движущийся со скоростью v_0, равной 0,8 скорости света, вдоль оси x, попадает в однородное электрическое поле с напряженностью E, силовые линии которого направлены противоположно оси y. Вычислить относительное изменение скорости частицы $\Delta v/v_0$ в направлении оси x за счет прохождения дополнительной разности потенциалов $\Delta U_y=5$ кВ в поперечном поле плоского конденсатора.

1.56. После прохождения некоторой ускоряющей разности потенциалов электроны поступают в однородное магнитное поле. При каком значении ускоряющего напряжения период обращения электронов возрастает на 50% по сравнению с его значением для малых скоростей?

1.57. Электроны с кинетической энергией 200 кэВ попадают в точке A в однородное поперечное магнитное поле (рис. 1.18). При какой индукции B электроны покидают магнитное поле, изменив направление движения на 180°, если a=100 мм. Проставить направление вектора **B**.

1.58. Определить радиусы орбит и периоды обращения электрона и протона, движущихся в однородном поперечном магнитном поле с индукцией 1,6 Тл, если кинетическая энергия частиц равна 10 МэВ.

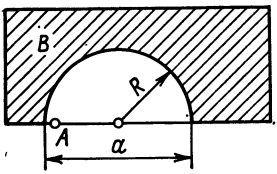


Рис. 1.18.

1.59. Электроны, ускоренные разностью потенциалов 100 кВ, через отверстие в аноде попадают слабо расходящимся пучком в однородное магнитное поле, силовые линии которого параллельны оси пучка. Найти наименьшую индукцию магнитного поля, при которой электроны пучка фокусируются в точке, удаленной на 0,5 м от отверстия в аноде.

1.60. Электрон с малой скоростью влетает в пространство между пластинами плоскопараллельного заряженного конденсатора, на который в отрицательном направлении оси z параллельно пластинам наложено магнитное поле с индукцией B. Начальная скорость электрона перпендикулярна пластинам. Напряженность электрического поля E. Найти радиус круга, образующего циклоиду, по которой будет двигаться электрон. Выяснить условия, при которых электрон не достигнет верхней положительно заряженной пластины. На каком расстоянии от места вылета он попадает на отрицательно заряженную пластину в этом случае?

1.61. Начальная скорость электрона, начавшего свое движение в однородных скрещенных полях, равна нулю. Определить: а) характер траектории движения электрона; б) максимальное его снижение вдоль вектора электрического поля; в) среднюю поступательную скорость электрона; г) угловую частоту, с которой электрон колеблется вдоль вектора электрического поля, если напряженность электрического поля E=500 В/м, а индукция магнитного поля B=1 Тл.

1.62. В однородных скрещенных полях электрон начал свое движение с начальной скоростью v_0, равной нулю. Траекторию электрона описывает некоторая точка окружности, катящейся по горизонтальной плоскости. Во сколько раз нужно изменить напряженность электрического поля и индукцию магнитного поля, чтобы радиус образующей окружности увеличился в 2 раза?

1.63. В однородных скрещенных полях вращается электрон с начальной скоростью $\omega=10^{11}$ рад/с. Определить радиус окружности, точка которой описывает траекторию движения электрона, если напряженность электрического поля E=20 кВ/м.

1.64. Определить характер траектории движения электрона, максимальную высоту его подъема и расстояние, которое он проходит в скрещенных полях вдоль вектора E за время $t=10^{-11}$ с, если ско-

рость выхода электрона в скрещенные поля $v_0=10^7$ м/с, а направление его движения совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля. Напряженность электрического поля $E=2\cdot10^5$ В/м, индукция магнитного поля $B=0{,}1$ Тл.

1.65. Электрон влетает в однородные скрещенные поля со скоростью $v_0=4\cdot10^4$ м/с в направлении, совпадающем с его переносной скоростью $u=E/B$. Определить характер траектории движения электрона и его максимальную высоту подъема, если напряженность электрического поля $E=20$ кВ/м, а индукция магнитного поля $B=0{,}1$ Тл.

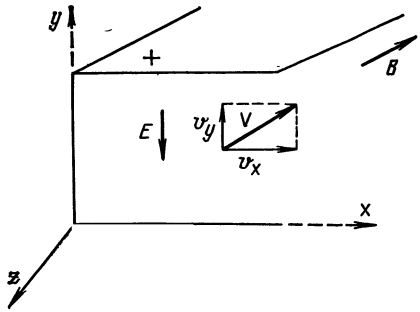


Рис. 1.19.

1.66. Электрон влетел в однородные скрещенные поля с начальной скоростью $v_0=4\cdot10^4$ м/с в направлении, противоположном переносной скорости $u=E/B$. Определить характер траектории движения и максимальную высоту подъема электрона, если напряженность электрического поля $E=20$ кВ/м, а индукция магнитного поля $B=0{,}1$ Тл.

1.67. Электрон, имеющий значительную начальную скорость v_0, попадает в пространство со скрещенными электрическим и магнитным полями. Определить: а) траекторию движения электрона; б) условия, при которых траектория будет прямой линией; в) время движения электрона по ветви циклоиды. Направления векторов **E**, **B** и **v** указаны на рис. 1.19.

1.68. Заряженная частица, имеющая начальную скорость $v_0=2\cdot10^7$ м/с, движется между обкладками цилиндрического конденсатора по круговой траектории, концентрической к обкладкам конденсатора. Радиусы цилиндрических обкладок $R_1=50$ мм, $R_2=60$ мм, между обкладками приложена разность потенциалов 800 В. Определить значение и направление индукции однородного магнитного поля, в котором заряженная частица будет двигаться точно так же, как и в цилиндрическом конденсаторе.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ. КАТОДЫ

2.1. Концентрация электронов в некотором металле составляет 10^{30} м$^{-3}$. Определить максимальное значение энергии электрона в этом образце при 0 К (уровень Ферми).

2.2. Концентрация электронов в металлическом образце составляет $2\cdot10^{30}$ м$^{-3}$. Определить работу выхода, если энергия, необходимая для удаления электрона с минимальным значением энергии из металла на бесконечно большое расстояние, равна 60 эВ.

2.3. Максимальная скорость электрона в вольфрамовом катоде равна $1{,}77\cdot10^6$ м/с. До какого значения должна быть повышена скорость электрона, чтобы он мог выйти из металла?

2.4. Какая доля электронов, эмиттируемых с поверхности металла, имеет нормальную составляющую скорости выше средней?

2.5. Рассчитать среднюю начальную энергию электронов в электрон-вольтах при вылете их из катода, нагретого до температуры $T=2400$ К.

2.6. Анодное напряжение диода равно —0,5 В. С какой минимальной начальной энергией должен вылетать электрон из катода, чтобы достигнуть анода: а) если пренебречь контактной разностью потенциалов; б) если принять, что катод и анод имеют работы выхода соответственно 1,5 и 2,7 эВ?

2.7. Ток эмиссии катода с площадью поверхности 0,1 см^2 равен 0,5 А при температуре $T=1400$ К и 1,9 А при температуре $T=1600$ К. Определить постоянные A и b_0 в уравнении термоэлектронной эмиссии.

2.8. При какой напряженности электрического поля можно получить плотность тока эмиссии 500 А/м^2, если вольфрамовый катод имеет температуру 2400 К? На сколько электрон-вольт уменьшится при этом работа выхода?

2.9. Перечислите потери мощности накала термоэлектронного катода. Катод работает при температуре 1800 К и имеет плотность тока эмиссии $j_э=10$ А/см^2. Площадь поверхности катода $П=0{,}05$ см^2, работа выхода катода $\varphi_к=1{,}8$ эВ, напряжение накала 10 В, ток накала 1 А. Какая часть мощности накала расходуется на эмиссию электронов?

Решение. Тепло, подводимое к катоду, расходуется на: а) излучение; б) теплоотвод держателями катода; в) на совершение электронами работы выхода; г) потери на сообщение электронам начальной скорости.

Если катод работает в режиме насыщения, то мощность потерь, указанная в пп. «в» и «г»,

$$P=I_э(\varphi_к+2kT/e),$$

где P — мощность; $I_э$ — ток эмиссии; $I_э\varphi_к$ — мощность, необходимая для совершения работы выхода: $I_э\cdot2kT/e$ — мощность, затрачиваемая для сообщения электронам средней начальной энергии $2kT$, необходимой для их эмиссии. Подставляя в формулу для мощности числовые данные, получаем:

$$P=0{,}05\cdot10\cdot1{,}8+0{,}05\cdot10\,\frac{2\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot1800}{1{,}6\cdot10^{-19}}=0{,}9+0{,}155=1{,}15\text{ Вт}.$$

Мощность накала

$$P_н = I_н U_н = 1 \cdot 10 = 10 \text{ Вт}.$$

Определим, какая часть мощности в процентах затрачивается на эмиссию электронов:

$$P \cdot 100/P_н = 1{,}15 \cdot 100/10 = 11\%.$$

2.10. На каком расстоянии от вольфрамового катода затрачивается 99,9% всей работы, необходимой для выхода электрона из катода в вакуум?

2.11. Чему равно ускоряющее поле у поверхности вольфрамового катода, если оно вызывает уменьшение работы выхода на 2,07 и 1,45%?

2.12. На сколько электрон-вольт изменится работа выхода электрона, если напряженность поля у поверхности катода равна $1{,}2 \cdot 10^7$ В/м?

2.13. Имеются цилиндрический катод радиусом $r_к = 0{,}01$ см и коаксиальный цилиндрический анод радиусом $r_а = 1{,}0$ см. Температура катода $T = 2500$ К. Подсчитать процент увеличения тока эмиссии, вызванного эффектом Шоттки (по сравнению с током без учета эффекта), если между анодом и катодом имеется ускоряющая разность потенциалов $U = 600$ В.

Решение. Напряженность электрического поля E в области между электродами цилиндрического конденсатора равна:

$$E = \frac{U}{\ln (r_а/r_к)\, r}.$$

Подставив числовые данные из условия задачи, получим:

$$E = \frac{600}{\ln\left(\frac{1 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-4}}\right)} \frac{1}{1 \cdot 10^{-4}} = 1{,}303 \cdot 10^6 \text{ В/м}.$$

Ток эмиссии $I_э$ за счет эффекта Шоттки увеличивается по сравнению с током эмиссии $I_{э0}$ в отсутствие поля в соответствии с выражением

$$I_э = I_{э0}\, e^{0{,}44\sqrt{E}/T},$$

отсюда

$$I_э/I_{э0} = e^{0{,}44\sqrt{E}/T}.$$

Следовательно,

$$\frac{I_э}{I_{э0}} = e^{0{,}44\sqrt{1{,}303 \cdot 10^6}/2500} = 1{,}22.$$

Таким образом, эффект Шоттки в данном случае вызывает увеличение тока эмиссии на 22%.

2.14. На сколько электрон-вольт должна измениться работа выхода материала катода, чтобы ток эмиссии этого катода при температуре $T = 2400$ °С уменьшился на 10%?

2.15. Какова работа выхода из металла, если повышение температуры нити накала, сделанной из этого металла, от 2000 до 2001 К увеличивает ток эмиссии в электронной лампе на 1%?

2.16. Катод, изготовленный из вольфрамовой нити, диаметр которой d=0,015 см, имеет температуру T=2700 К. На сколько градусов изменится его температура, если с него снимать полный эмиссионный ток? Считать, что катод имеет постоянную температуру по всей длине.

2.17. Ток эмиссии катода, работающего при температуре T=2100 К, в течение некоторого интервала времени снижается на 5%. С каким изменением работы выхода связано это снижение? На сколько процентов необходимо повысить напряженность электрического поля у катода для восстановления исходного уровня эмиссии, если в нормальных рабочих условиях напряженность поля у катода равна 10^4 В/см?

2.18. При какой напряженности электрического поля у поверхности вольфрамового катода работа выхода уменьшится на 3%? Температура катода T=2400 К.

2.19. Какой процент электронов, находящихся в вольфрамовой проволоке при T=2600 К, может преодолеть потенциальный барьер вблизи катода высотой 1 эВ?

Решение. 1. Воспользуемся соотношением $I = I_э e^{-U/U_T}$, где температурный потенциал

$$U_T = kT/e = 1{,}38 \cdot 10^{-23} T/(1{,}602 \cdot 10^{-19}) \approx T/11\,600.$$

2. Определим, какая часть электронов способна преодолеть потенциальный барьер высотой 1 эВ:

$$\frac{I}{I_э} = e^{-(11\,600 \cdot 1)/2600} = e^{-4{,}46} \approx 0{,}012.$$

Следовательно, только около 1,2% электронов в вольфрамовой проволоке при T=2600 К имеют энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера высотой 1 эВ.

2.20. Вольфрамовый катод с эффективной длиной 100 мм и диаметром 0,2 мм работает при температуре 2400 К. Чему равен ток эмиссии? На сколько процентов увеличится ток эмиссии, если температуру повысить на 5%?

2.21. Рассчитать и построить график зависимости тока эмиссии вольфрамового катода от температуры в интервале температур от 2000 до 2600 К. Катод изготовлен из проволоки диаметром 0,5 мм и эффективной длиной 80 мм.

2.22. Рассчитать и построить график зависимости плотности тока эмиссии карбидированного катода от температуры в интервале температур от 1700 до 2200 К.

2.23. Вольфрамовый, торированный и оксидный катоды нагреты соответственно до температур 2400, 1900 и 1000 К. Как относятся площади этих катодов, если токи эмиссии катодов одинаковы?

2.24. Произвести те же расчеты, что и в задаче 2.23, если все катоды нагреты до температуры $T=1000$ К.

2.25. Ток эмиссии торированного катода, работающего при температуре 1900 К, равен 85 мА. Определить ток эмиссии вольфрамового катода, нагретого до 2500 К, если размеры обоих катодов одинаковы.

2.26. Ток эмиссии карбидированного катода, работающего при температуре $T=2000$ К, равен 100 мА. Чему равен ток эмиссии вольфрамового катода, нагретого до такой же температуры, если размеры обоих катодов одинаковы?

Решение. Токи эмиссии катодов определяются по формуле

$$I_э = ПAT^2e^{-b_0/T}.$$

Ток эмиссии вольфрамового катода

$$I_{эW} = П\cdot 60\cdot 10^4\cdot 2000^2e^{52\,400/2000}. \qquad (1)$$

Аналогично ток эмиссии карбидированного катода

$$I_э = 0{,}1 = П\cdot 1{,}15\cdot 10^2\cdot 2000^2e^{-17\,400/2000}. \qquad (2)$$

Разделив почленно (1) на (2), получим:

$$\frac{I_{эW}}{0{,}1} = \frac{60\cdot 10^4}{1{,}15\cdot 10^2}\,e^{-52\,400/2000+17\,400/2000},$$

откуда $I_{эW} = 0{,}1\cdot 5220e^{-17{,}5} = 13{,}1\cdot 10^{-6}$ А $= 13{,}1$ мкА.

2.27. Вольфрамовый катод с эффективной длиной 2,4 см и диаметром 1,6 мм нагревается до температуры $T=2550$ К. Определить: а) ток эмиссии; б) какова должна быть рабочая температура катода, имеющего такие же геометрические размеры, но изготовленного из торированного вольфрама, чтобы получить такой же ток эмиссии.

2.28. При какой температуре торированный катод будет давать в 5000 раз больший ток эмиссии по сравнению с током эмиссии катода из чистого вольфрама при той же самой температуре? Размеры катодов одинаковы.

Решение. Токи эмиссии торированного I_{T-W} и вольфрамового I_W катодов соответственно равны:

$$I_{T\text{-}W} = П\,(3{,}0\cdot 10^4)\,T^2e^{-2{,}63/kT}; \qquad (1)$$

$$I_W = П\,(60\cdot 10^4)\,T^2e^{-4{,}52/kT}, \qquad (2)$$

где $П$ — площадь катода.

Деля эти два выражения одно на другое, получаем:

$$\frac{I_{T\text{-}W}}{I_W} = 5000 = \frac{3}{60}\,e^{\frac{4{,}52-2{,}63}{8{,}65\cdot 10^{-5}T}} = \frac{1}{20}\,e^{21\,900/T},$$

откуда

$$5\cdot10^3\cdot20=e^{21\,900/T},$$

т. е.

$$21\,900/T=\ln(5\cdot10^3\cdot20).$$

Следовательно, $T=1900$ К.

2.29. Определить удельную эмиссию, удельную мощность накала и эффективность катода, у которого при температуре $T=2650$ К ток эмиссии равен $I_э=830$ мА. Напряжение накала $U_н=17$ В, ток накала $I_н=6$ А, эффективная поверхность катода равна $П=1{,}5$ см². Как изменяются параметры катода при изменении его температуры (напряжения или тока накала)?

2.30. Оксидный катод с диаметром 1 мм и эффективной длиной 2 см работает при температуре $T=1000$ К. Определить ток эмиссии, удельную мощность накала и эффективность катода, если напряжение накала равно 6,3 В и ток накала 0,3 А.

Решение. Найдем плотность тока эмиссии, полагая для оксидного катода $A=0{,}01$ А/(см²·К²) и $b_0=11\,200$ К

$$j_э=AT^2e^{-b_0/T}=0{,}01\cdot1000^2e^{-11\,200/1000}=0{,}137\ \text{А/см}^2.$$

Ток эмиссии

$$I_э=j_эП=j_э\pi dl=0{,}137\cdot3{,}14\cdot0{,}1\cdot2=0{,}086\ \text{А}=86\ \text{мА}.$$

Мощность накала катода

$$P_н=U_нI_н=6{,}3\cdot0{,}3=1{,}89\ \text{Вт}.$$

Удельная мощность накала

$$P'_н=P_н/П=1{,}89/(3{,}14\cdot0{,}1\cdot2)=3{,}01\ \text{Вт/см}^2.$$

Эффективность катода

$$H=I_э/P_н=86/1{,}89=45{,}5\ \text{мА/Вт}.$$

2.31. Почему при снятии накальных характеристик анодное напряжение лампы должно быть выключено?

2.32. Каковы недостатки катодов прямого накала и почему этих недостатков лишены катоды косвенного накала?

2.33. Почему работа выхода оксидного катода много ниже работы выхода катодов других типов? Что представляет собой оксидный катод до и после активирования?

2.34. Было обнаружено, что в лампах с оксидным катодом случайные перегрузки могут вызвать значительное уменьшение тока эмиссии. Уменьшенная таким образом эмиссия может быть восстановлена, если катод в течение небольшого промежутка времени будет нагреваться сильнее, чем обычно. Объясните, что происходит на катоде во время этого дополнительного подогрева.

2.35. Вольт-амперная характеристика подогревателя катода имеет вид, показанный на рис. 2.1. Объясните, почему при малых напряжениях накала она идет круто, а при больших — полого.

2.36. От источника напряжения 24 В надо питать накал четырех ламп, рассчитанных на напряжение накала 6 В. Три из этих ламп имеют ток накала 0,45 А, а четвертая 0,3 А. Как наиболее рационально осуществить цепь накала?

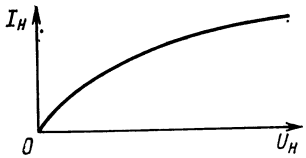


Рис. 2.1.

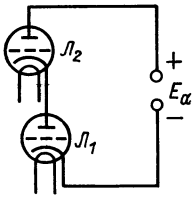


Рис. 2.2.

2.37. Лампы $Л_1$ и $Л_2$ (рис. 2.2) включены последовательно с источником анодного питания E_a и имеют питание накала от одного источника, изолированного от анодной цепи. Анодное напряжение лампы $Л_1$ составляет 300 В. Сопротивление изоляции катод — подогреватель лампы $Л_1$ равно 10 МОм, а лампы $Л_2$ 5 МОм. Предельное напряжение катод — подогреватель 100 В. Есть ли опасность пробоя изоляции катод — подогреватель?

2.38. Какой из материалов, цезий или вольфрам, пригоден для изготовления фоточувствительного слоя для видимой области спектра?

2.39 *. На кислородно-цезиевый фотокатод падает монохроматический пучок света, под действием которого из фотокатода вылетают электроны с максимальной скоростью 600 км/с. Определить длину волны падающего пучка света.

Работа выхода материала катода равна 1,0 эВ.

2.40 *. Вычислите энергию фотонов: а) желтого света с длиной волны λ=0,5893 мкм; б) синего света с длиной волны λ=0,421 мкм; в) ультрафиолетового излучения с длиной волны λ=0,2557 мкм. Определить максимальную скорость электронов, выбиваемых каждым из указанных выше фотонов с поверхности цезиевого фотокатода, имеющего работу выхода 1,81 эВ.

2.41 *. Вычислить максимальную скорость электронов, выбиваемых с поверхности сурьмяно-цезиевого фотокатода под действием монохроматического пучка света с длиной волны 0,4 мкм. Работа выхода сурьмяно-цезиевого фотокатода равна 1,5 эВ.

---

* При решении задач 2.39—2.48 предположить, что температура фотокатодов T=0 К.

2.42 *. Определить максимальную скорость вылетевших из металла электронов при облучении фотокатода светом с длиной волны 0,2 мкм, если работа выхода электронов 1 эВ.

2.43 *. Вычислить работу выхода фотокатода при длине волны, равной 1,2 мкм, соответствующей длинноволновой границе фотоэффекта.

2.44 *. Монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=0{,}6$ мкм освещают материалы, данные в таблице. Из какого материала электроны будут выбиваться с наибольшей скоростью? Чему равна эта скорость?

Материал	Работа выхода, эВ	Материал	Работа выхода, эВ	Материал	Работа выхода, эВ
Кальций	2,24	Молибден	4,44	Тантал	4,07
Углерод	4,0	Никель	2,77	Торий	3,35
Цезий	1,81	Платина	5,08	Вольфрам	4,52

2.45 *. Определить граничные частоты для материалов, указанных в предыдущей задаче. В какой части спектра они расположены?

2.46 *. Определить длинноволновую границу фотоэффекта для чистого цезия.

2.47 *. Вычислить длину волны монохроматического пучка света, падающего на кислородно-цезиевый фотокатод, работа выхода которого равна 1,0 эВ, если известно, что максимальная скорость электронов, выбиваемых с поверхности катода, равна 500 км/с.

2.48 *. Под действием монохроматического пучка света с длиной волны 0,5 мкм из сурьмяно-цезиевого фотокатода, работа выхода которого равна 1,5 эВ, вылетают электроны. Определить их максимальную скорость.

2.49. Чему равен темновой ток фотоэлемента, обусловленный термоэлектронной эмиссией сурьмяно-цезиевого фотокатода, имеющего площадь 10 см^2 и температуру 300 К?

2.50. Магниевый фотокатод облучается ультрафиолетовыми лучами, длина волны которых 0,35 мкм. При каком анодном напряжении ни один электрон не достигнет анода?

2.51. Анодом фотоэлемента служит цилиндр, диаметр которого 1,5 см; катодом является платиновая нить диаметром 0,1 см. Каково смещение красной границы фотоэффекта, если к аноду приложить напряжение в 2 кВ?

2.52. Алюминиевая пленка толщиной 3 мкм бомбардируется электронами. Определить: а) какую энергию должны иметь электроны, чтобы они смогли пройти эту пленку; б) на каком участке своего пути в материале электрон расходует энергию интенсивнее — на конечном или начальном?

2.53. При какой энергии первичных электронов коэффициент вторичной эмиссии для никеля будет иметь максимальное значение? Для никеля постоянная Виддингтона $c=7{,}4\cdot10^{13}$ (эВ)^2/м для малых энергий 0,5—1 кэВ. Средняя длина свободного пробега $l=3\cdot10^{-9}$ м.

2.54. В приборе для измерения коэффициента вторичной эмиссии найти минимальное значение напряжения на коллекторе, при котором возможно измерение всего тока вторичных электронов. Ток первичных электронов составляет 100 мА, максимальный коэффициент вторичной эмиссии равен 12. Коллектор имеет форму диска диаметром 4 см и отстоит от эмиттера на расстоянии 2 см.

Глава третья

ДИОДЫ

3.1. В вакууме на расстоянии d друг от друга размещены два плоскопараллельных электрода с площадью поверхности каждого электрода $П$ (рис. 3.1). Эти электроды замкнуты между собой накоротко. Между электродами движется заряд (слой электронов) q и создает конвекционный ток. Какова зависимость этого тока от объемной плотности заряда ρ и скорости его движения? Какие заряды будут наводиться на электродах и от чего зависит их значение?

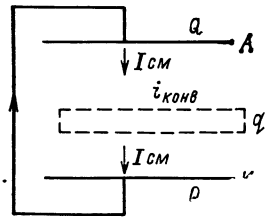


Рис. 3.1.

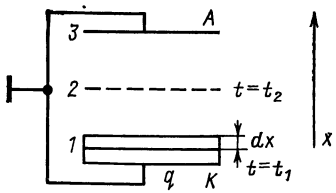


Рис. 3.2.

3.2. Как будут изменяться наведенные на электродах заряды при смещении заряда q в сторону электрода A (рис. 3.1) и какой эффект вызовут эти перемещения во внешней цепи?

3.3. От каких факторов зависят значения наведенных токов во внешней цепи? Напишите общее выражение для наведенного во внешней цепи тока при полном заполнении междуэлектродного пространства движущимися зарядами. В каком случае наведенный ток точно равен конвекционному?

3.4. Раскройте физические причины появления тока смещения и напишите выражение, определяющее значение это-

го тока. В каком случае ток смещения в междуэлектродном пространстве равен наведенному току во внешней цепи?

3.5. На рис. 3.2 показана система электродов. От катода к аноду движется заряд q, постепенно заполняя все междуэлектродное пространство. Требуется: а) нарисовать диаграммы токов в сечениях *1*, *2* и *3* в зависимости от времени, если известно, что электроны вылетели из катода в момент времени $t=t_1$ со скоростью v_0; б) написать в общем виде выражения, связывающие ток во внешней цепи с токами в сечении *2* в момент времени $t=t_2$.

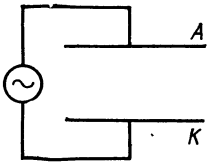


Рис. 3.3.

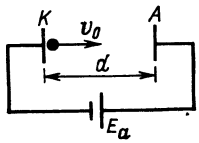


Рис. 3.4.

3.6. Как изменяются конвекционный ток и ток смещения в зависимости от координаты x (рис. 3.2) и чему будет равен полный ток вдоль всего промежутка катод — анод в любой момент времени?

3.7. Между катодом и анодом приложено переменное напряжение с периодом T (рис. 3.3), сравнимым с временем движения электронов t между электродами. Как будут меняться объемная плотность пространственного заряда и скорость электронов? Напишите выражение для полного тока во внешней цепи, соответствующее заданным условиям.

3.8. Между плоскопараллельными электродами вакуумного диода (рис. 3.4) приложено напряжение $E_а$. Расстояние между пластинами d. В момент времени $t=0$ электрон начинает свое движение к аноду с начальной скоростью v_0. Выразите ток, протекающий во внешней цепи, в функции времени.

3.9. Решить предыдущую задачу при условии, что полярность батареи изменена на противоположную. Рассмотреть случаи, когда начальная энергия электрона равна $2eE_а$, $eE_а$ и $0{,}5eE_а$, эВ.

3.10. Решить задачу 3.8 при условии, что в качестве источника используется генератор, напряжение которого изменяется во времени по закону $e=kt$.

3.11. Изобразите потенциальные диаграммы диода с плоскопараллельными электродами при постоянном напряжении анода и различных напряжениях накала.

3.12. Изобразите потенциальные диаграммы диода при постоянном напряжении накала для следующих случаев: 1) анодный ток равен нулю; 2) диод работает в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом; 3) диод работает в режиме насыщения. Эти диаграммы рассмотреть для случаев, когда начальные скорости электронов: а) равны нулю; б) больше нуля.

3.13. Начертить потенциальные диаграммы диода при анодном напряжении $U_a=0$ и трех различных значениях напряжения накала.

3.14. Начертить потенциальные диаграммы диода при разрыве цепи анода для трех различных значений напряжения накала.

3.15. Анод диода соединен с катодом через некоторый резистор. В диоде протекает небольшой начальный ток. С учетом контактной разности потенциалов между анодом и катодом определить: а) какая потенциальная диаграмма будет в этом случае; б) каков потенциал анода этого диода относительно катода?

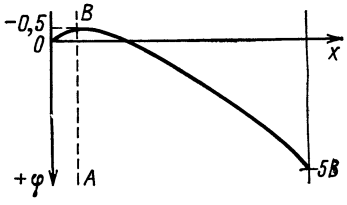


Рис. 3.5.

3.16. Потенциальная диаграмма диода при анодном напряжении $U_a=5$ В показана на рис. 3.5. Найти энергию электронов при пролете ими плоскости AB (вершина потенциального барьера) и при ударе об анод, если они вылетают из катода с начальными энергиями 0,3; 0,8 и 1,2 эВ.

3.17. В плоскопараллельном диоде, электроды которого удалены друг от друга на расстояние d, существует постоянное распределение плотности объемного заряда ρ. Пусть потенциал анода относительно катода положительный. Используя уравнение Пуассона, получите выражение для распределения потенциала между электродами.

3.18. Покажите, что в плоскопараллельном диоде, работающем в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом, напряженность электрического поля, скорость электронов и объемная плотность зарядов выражаются следующими уравнениями: $E=k_1X^{1/3}$; $v=k_2X^{2/3}$; $\rho=k_3X^{-2/3}$. Определите также постоянные k_1, k_2 и k_3.

3.19. Найти анодное напряжение относительно средней точки и каждого конца катода (A, B, C) прямого накала для двух схем включения, показанных на рис. 3.6,*а*, *б*.

3.20. Объясните следующий способ проверки наличия эмиссии у катода диода. При нормальном напряжении на-

кала между анодом и катодом включают вольтметр со шкалой на единицы вольт (минусовым зажимом к аноду). Если катод эмиттирует электроны, то вольтметр покажет напряжение около десятых долей вольта (рис. 3.7).

3.21. Плоскопараллельный диод работает в режиме тормозящего поля. Определить отрицательное анодное напряжение, при котором анодный ток в диоде уменьшится в 10 раз по сравнению с током эмиссии. Рабочая температура катода T=1000 К.

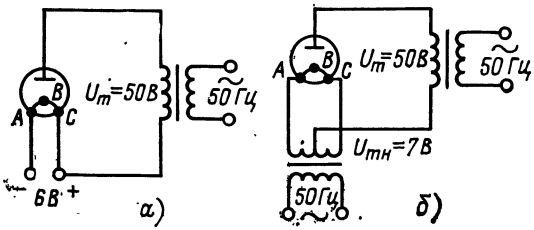


Рис. 3.6.

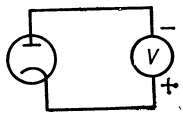


Рис. 3.7.

3.22. Определить анодный ток диода цилиндрической конструкции, если диаметр анода $d_а$=2 см, диаметр катода $d_к$=4 мм, эффективная длина анода $l_а$=3,5 см, анодное напряжение $U_а$=500 В.

Решение. В режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом анодный ток можно определить по закону «степени 3/2»:

$$I_а = \frac{14{,}65\cdot 10^{-6} l_а}{r_а \beta^2} U_а^{3/2}.$$

Значение β^2 находим из графика $\beta^2 = f(r_а/r_к)$ (см. рис. П.1):

$$r_а/r_к = 1/0{,}2 = 5,$$

поэтому β^2=0,77.

Следовательно,

$$I_а = \frac{14{,}65\cdot 10^{-6}\cdot 3{,}5\,(500)^{3/2}}{1\cdot 0{,}77} \approx 0{,}74\ \text{А} = 740\ \text{мА}.$$

3.23. Диод с плоскопараллельными электродами работает в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом. Анодный ток $I_а$=20 мА при анодном напряжении $U_а$=100 В. Полагая, что для диода справедлив закон «степени 3/2», определить: а) при каком анодном напряжении анодный ток увеличится вдвое; б) чему будет равен анодный ток, если анодное напряжение увеличить в 2 раза; в) какой ток может быть получен в диоде анало-

гичной конструкции, но с увеличенной вдвое площадью эффективной поверхности и уменьшенным вдвое расстоянием между электродами при условии, что анодное напряжение $U_а$=100 В?

3.24. Диод с плоскопараллельными электродами работает в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом. Анодный ток $I_а$=100 мА при анодном напряжении 30 В. Предполагая, что для диода справедлив закон «степени 3/2», определить, при каком анодном напряжении анодный ток равен 20 мА.

3.25. Два диода с цилиндрической конструкцией электродов работают в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом. Они имеют одинаковые размеры анодов (диаметр $d_а$=4 мм, $l_а$=2 см), но различные диаметры катодов. Диаметр $d_к$ одного катода равен 0,1 мм, другого — 1,5 мм. Сравните анодные токи этих диодов при анодном напряжении на каждом диоде 25 В. Предполагается, что для диодов справедлив закон «степени 3/2».

3.26. Диод цилиндрической конструкции имеет следующие размеры электродов: диаметр анода $d_а$=1 см, диаметр катода $d_к$=0,16 см, длина анода $l_а$=1,8 см. При рабочей температуре ток эмиссии катода $I_э$=40 мА. Чему равен анодный ток, если: а) $U_а$=50 В; б) $U_а$=100 В? Предполагается, что в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом для диода справедлив закон «степени 3/2».

3.27. Анодный ток диода выражается зависимостью $I_а = kU^n_а$. Определить коэффициент k и показатель степени n, если известно, что при анодном напряжении $U_а$=100 В анодный ток $I_а$=10 мА, а при анодном напряжении $U_а$=10 В анодный ток $I_а$=0,3 мА.

3.28. В диоде плоской конструкции расстояние между катодом и анодом d=1 см. Плотность тока термоэлектронной эмиссии $j_э = 3 \cdot 10^3$ А/м^2. Определить, при каком наименьшем анодном напряжении все электроны, эмиттируемые катодом, достигают анода.

3.29. Ток в амперах, протекающий в идеальном диоде, характеризуется следующими зависимостями: $I = (T^2/100)e^{-20\,000/T}$ — в режиме насыщения; $I = 0{,}01\ U_а^{3/2}$ — в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом. Какое минимальное анодное напряжение должно быть приложено для работы диода в режиме насыщения, если рабочая температура катода T=2000 К?

3.30. Нарисовать теоретические и реальные характеристики диода для трех значений напряжения накала. Объяснить причины, вызывающие отклонение реальных характе-

ристик от теоретических в режимах тормозящего поля, ограничения анодного тока пространственным зарядом и насыщения. Объяснить также, от каких факторов зависит значение анодного тока диода на начальном участке характеристики?

3.31. Изобразить и объяснить анодные характеристики двух диодов, отличающихся: а) диаметрами анодов; б) материалами катодов.

3.32. Рассчитать и построить анодную характеристику кенотрона 6Ц4П при изменении анодного напряжения от 0 до 25 В, если длина анода $l_а$=11,3 мм, диаметр анода $d_а$=2,62 мм, диаметр катода $d_к$=1,54 мм. Предполагается, что для кенотрона справедлив закон «степени 3/2». На этом же графике построить характеристику кенотрона, взятую из справочника. Объясните причины различия.

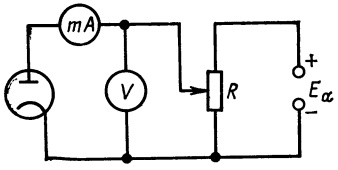


Рис. 3.8.

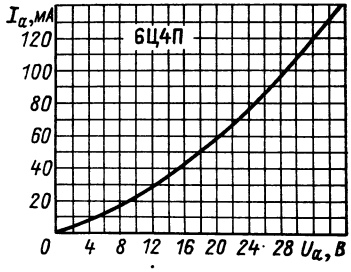


Рис. 3.9.

3.33. Рассчитать и построить анодную характеристику двуханодного кенотрона 6Ц5С при изменении анодного напряжения от 0 до 50 В, если длина анода $l_а$=10 мм, диаметр анода $d_а$=3 мм, диаметр катода $d_к$=1,9 мм. Расчет вести для одного анода. Предполагается, что для кенотрона справедлив закон «степени 3/2». На этом же графике построить характеристику кенотрона, взятую из справочника. Объяснить причины различия.

3.34. Рассчитать вольт-амперную характеристику диода с плоской конструкцией электродов, помещенных в однородное поперечное магнитное поле, если плотность тока эмиссии катода $j_э$=1000 А/м^2, индукция магнитного поля B=0,01 Тл, площади катода и анода равны 2 см^2, расстояние между электродами 1 мм. Эффектом Шоттки пренебречь.

3.35. Если в схеме для исследования диода (рис. 3.8) ползунок потенциометра R поставить в среднее положение, то вольтметр покажет напряжение, равное не 0,5$E_а$, а меньшее. Почему?

3.36. Аппроксимировать характеристику диода 6Ц4П для больших токов прямой линией и написать уравнение этой линии (рис. 3.9).

3.37. Определить, на сколько процентов увеличится ток эмиссии в диоде цилиндрической конструкции за счет наличия внешнего ускоряющего поля у поверхности катода, если анодное напряжение равно 280 В, диаметр катода $d_к$= =3,4 мм, диаметр анода $d_а$=4 мм и температура катода $T_к$=2600 К.

3.38. Определить относительное увеличение тока эмиссии в диоде цилиндрической конструкции за счет наличия внешнего ускоряющего поля у поверхности катода. Диод имеет следующие данные: диаметр катода $d_к$=4 мм, диаметр анода $d_а$=2 см, анодное напряжение $U_а$=1000 В, температура катода $T_к$=1000 К.

3.39. При изменении анодного напряжения на 2 В анодный ток диода 6Х6С изменился на 4 мА. Определить крутизну S и внутреннее сопротивление R_i диода.

3.40. В плоскопараллельном диоде, работающем в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом, действующая поверхность анода $П$=6 см^2, расстояние от катода до анода $r_а$=2 мм. Рассчитать параметры диода S, R_i и R_0 при анодном напряжении $U_а$=50 В, считая, что для данного диода справедлив закон «степени 3/2».

3.41. Полагая, что для диода справедлив закон «степени 3/2», доказать математически, что отношение внутренних сопротивлений постоянному и переменному току диода является постоянным значением, равным 3/2. Объяснить, почему сопротивление диода постоянному току не равно сопротивлению диода переменному току.

3.42. В плоскопараллельном диоде, работающем в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом, анодный ток равен 100 мА при анодном напряжении 100 В. Считая, что справедлив закон «степени 3/2», определить: а) R_0, R_i и S при $U_а$=100 В; б) R_0, R_i и S при $U_а$= =50 В.

3.43. Диод имеет вольт-амперную характеристику, описываемую следующим выражением: $I_а=0{,}259\ U_а^{1{,}37}$, где $I_а$ — анодный ток, мА; $U_а$ — анодное напряжение, В. Определить аналитически: R_0 при $U_а$, равном 1; 4; 7; 10; 30 В; R_i при тех значениях анодного напряжения и объяснить причину расхождения R_0 и R_i. Построить вольт-амперную характеристику диода и определить из нее R_0 и R_i графически.

3.44. Уравнение анодного тока диода $I_а=5\cdot10^{-4}\ U_а^{3/2}$ ($I_а$ измеряется в миллиамперах, $U_а$ в вольтах). Найти анод-

ный ток, крутизну характеристики S, сопротивление постоянному току R_0 и внутреннее сопротивление диода для случаев, когда анодное напряжение равно 4 и 25 В.

3.45. По анодной характеристике диода 6Ц4П (рис. 3.9) определить крутизну S, сопротивление постоянному току R_0 и внутреннее сопротивление R_i при U_a, равном 4; 8; 16; 24 и 32 В. Построить график зависимостей параметров от анодного напряжения и объяснить эти зависимости.

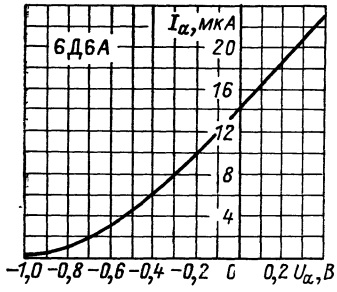


Рис. 3.10.

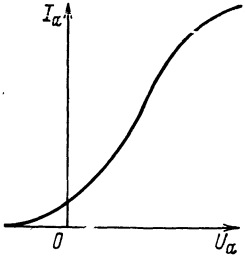


Рис. 3.11.

3.46. На начальном участке анодной характеристики диода 6Д6А (рис. 3.10) рассчитать параметры S, R_0 и R_i для точки, соответствующей анодному напряжению U_a=—0,4 В. Определить число электронов, ежесекундно попадающих на анод при напряжении анода U_a=0, а также их максимальную начальную скорость, полагая, что анодный ток I_a=0 при U_a=—1 В.

3.47. Реальная характеристика диода имеет вид, показанный на рис. 3.11. В какой точке этой характеристики $R_0=R_i$?

3.48. При небольших отрицательных анодных напряжениях в диоде существует анодный ток. В этом случае сопротивление диода постоянному току для внешнего источника получается отрицательным. Каков его физический смысл?

3.49. Объяснить, почему с уменьшением напряжения накала увеличивается внутреннее сопротивление диода.

3.50. Диод имеет линейно-ломаную характеристику с крутизной S=8 мА/В (рис. 3.12). Ток эмиссии катода составляет 100 мА. Считая анодную цепь замкнутой, найти анодный ток для значений потенциалов анода и катода, указанных ниже:

φ_a, В	—30	+100	0	25
$\varphi_к$, В	—40	+150	—20	+20

3.51. Через одну половину двойного кенотрона 6Ц4П проходит ток 80 мА. Пользуясь анодной характеристикой лампы (см. рис. 3.9), определить мощность, рассеиваемую анодом.

3.52. В диоде, работающем в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом, анодный ток $I_а$=5 мА при анодном напряжении $U_а$=100 В. Определить максимальное анодное напряжение, при котором мощность, рассеиваемая анодом, не превысит 16 Вт. Для данного диода справедлив закон «степени 3/2».

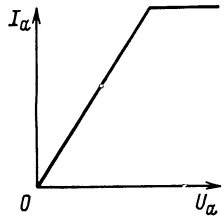


Рис. 3.12.

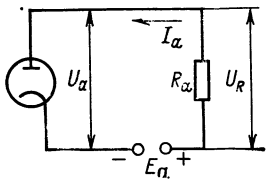


Рис. 3.13.

3.53. В диоде, работающем в режиме ограничения анодного тока пространственным зарядом, анодный ток $I_а$=50 мА при анодном напряжении $U_а$=30 В. Какой максимальный ток через диод можно допустить, если мощность, рассеиваемая анодом, не должна превышать 3,2 Вт? Предполагается, что для диода справедлив закон «степени 3/2».

3.54. Диод имеет следующие данные: максимально допустимая мощность, рассеиваемая анодом, P_{amax}=15 Вт, напряжение накала $U_н$=5 В, ток накала $I_н$=1 А, анодная характеристика описывается уравнением $I_а = 10^{-3}\ U_а^{3/2}$ ($I_а$ измеряется в амперах, $U_а$ — в вольтах). Определить максимальный анодный ток и максимальное анодное напряжение, если 70% мощности, подводимой к катоду, рассеивается анодом.

3.55. В анодную цепь диода включен нагрузочный резистор сопротивлением $R_а$=200 Ом. Чему равно напряжение источника анодного питания, если при анодном токе $I_а$=300 мА анодное напряжение равно 60 В?

3.56. Линия нагрузки диода, нагруженного сопротивлением $R_а$, пересекает ось $I_а$ в точке, соответствующей 50 мА. Определить $R_а$, если напряжение источника анодного питания $E_а$=200 В.

3.57. Кенотрон 5Ц3С (работает один диод) включен в схему, изображенную на рис. 3.13. Напряжение источника

анодного питания $E_а$=100 В, сопротивление резистора нагрузки $R_а$=250 Ом. Определить анодный ток кенотрона, анодное напряжение, напряжение на нагрузке и мощность, рассеиваемую анодом. Анодная характеристика кенотрона изображена на рис. 3.14.

Решение. Используя уравнение линии нагрузки $I_а = (E_а - U_а)/R_а$, наносим на анодную характеристику кенотрона 5Ц3С для заданного $R_а$=250 Ом линию нагрузки. Поскольку это уравнение первой степени относительно $U_а$, для построения достаточно двух точек. Задаваясь значения-

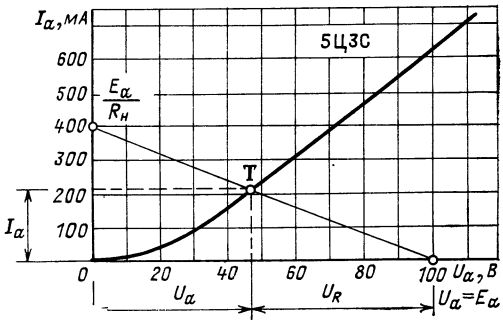


Рис. 3.14.

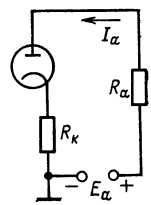


Рис. 3.15.

ми $I_а$=0 и $U_а$=0, получаем при $I_а$=0 $U_а=E_а$=100 В, при $U_а$=0 $I_а=E_а/R_а$=400 мА. Через эти точки проводим линию нагрузки. Точка пересечения линии нагрузки с анодной характеристикой — это и есть рабочая точка T. Проекция рабочей точки на ось ординат определит значение анодного тока $I_а$, протекающего через лампу, проекция рабочей точки на ось абсцисс — анодное напряжение $U_а$.

Как видно из рис. 3.14, $I_а$=210 мА, $U_а$=47 В. Напряжение на нагрузке определяется отрезком оси абсцисс, соответствующим разности напряжения источника анодного питания $E_а$ и анодного напряжения $U_а$, т. е. в рассматриваемом случае U_R=53 В. Мощность, рассеиваемая анодом лампы, $P_а=I_аU_а=210\cdot10^{-3}\cdot47\approx9{,}9$ Вт.

3.58. В анодную цепь одной половины кенотрона 5Ц3С включен резистор нагрузки сопротивлением $R_а$=200 Ом (см. рис. 3.13). Определить анодный ток, анодное напряжение и падение напряжения на нагрузке, если $E_а$ равно 60, 80 и 120 В. Анодная характеристика лампы изображена на рис. 3.14.

3.59. Кенотрон 5Ц3С, анодная характеристика которого (для одного диода) изображена на рис. 3.14, соединен с источником питания $E_а$ через резистор нагрузки $R_а$. Опреде-

лить анодный ток диода $I_а$, анодное напряжение $U_а$, напряжение на нагрузке U_R, если $E_а$ равно 200, 100 и 200 В, а $R_а$ соответственно 4000, 500 и 200 Ом.

3.60. В анодную цепь одной половины двойного диода 5Ц3С включен источник питания $E_а$=100 В (см. рис. 3.13). Определить анодный ток лампы $I_а$, анодное напряжение $U_а$ и падение напряжения на нагрузке U_R, если сопротивление резистора нагрузки $R_а$ равно 400, 200 Ом, 0. Какая мощность рассеивается анодом лампы при этих нагрузках? Анодная характеристика кенотрона изображена на рис. 3.14.

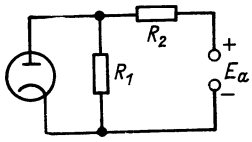


Рис. 3.16.

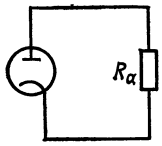


Рис. 3.17.

3.61. Построить рабочую характеристику кенотрона 5Ц3С (при изменении напряжения источника анодного питания от 9 до 100 В), если сопротивление резистора нагрузки, включенного в анодную цепь, равно 250 Ом.

3.62. Построить рабочую характеристику кенотрона 6Ц4П (при изменении напряжения источника анодного питания от 0 до 50 В), если сопротивление резистора нагрузки равно 500 Ом. Анодная характеристика кенотрона изображена на рис. 3.9.

3.63. В схеме, изображенной на рис. 3.15, $E_а$=200 В, $R_а$=15 кОм, $R_к$=3 кОм, $I_а$=10 мА. Найти: а) потенциалы катода и зажимов источника $E_а$, принимая потенциал отрицательного зажима источника за нулевой; б) потенциалы тех же точек для случаев, если нулевыми считать потенциалы катода и анода.

3.64. Для питания одной половины двуханодного кенотрона 6Ц4П используется схема, изображенная на рис. 3.16. Напряжение анодного источника $E_а$=60 В, R_1=200 Ом, R_2=500 Ом. Найти анодный ток и анодное напряжение. Анодная характеристика кенотрона для одного диода изображена на рис. 3.9.

3.65. Диод питается через делитель (рис. 3.16). Напряжение анодного источника 160 В, анодное напряжение 80 В, анодный ток 6 мА и ток делителя 2 мА. Найти ток делителя при выключенном накале диода.

3.66. Даны начальный участок характеристики диода 6Д6А (см. рис. 3.10) и сопротивление резистора нагрузки $R_а$=40 кОм, включенного в схему на рис. 3.17. Найти анодный ток $I_а$ и анодное напряжение $U_а$.

3.67. В анодную цепь диода включен нагрузочный резистор $R_а$, сопротивление которого во много раз больше сопротивления диода постоянному току R_0 (см. рис. 3.13). При уменьшении напряжения накала диода наблюдается увеличение мощности, рассеиваемой анодом (анод раскаляется докрасна). Объяснить это явление.

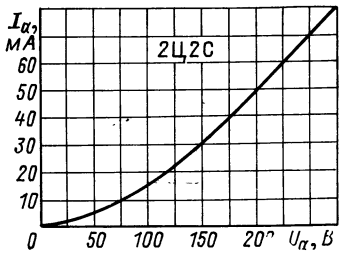


Рис. 3.18.

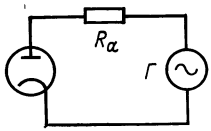


Рис. 3.19.

3.68. Диод 2Ц2С, анодная характеристика которого изображена на рис. 3.18, работает в простейшей однополупериодной схеме выпрямления без фильтра (рис. 3.19). Источник выпрямляемого напряжения *Г* дает синусоидальное напряжение с амплитудой 250 В. Выпрямленное напряжение снимается с резистора нагрузки $R_а$=5 кОм. Требуется: а) построить рабочую характеристику диода; б) изобразить на том же графике в координатах $I_а=f(\omega t)$ временную диаграмму анодного тока и определить его максимальное и среднее значения.

3.69. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, изобразить на графике временну́ю диаграмму анодного тока, если источник напряжения *Г* дает напряжение в вольтах вида: а) $U_г=150+100\sin\omega t$; б) $U_г=-100+200\sin\omega t$; в) $U_г=100+150\sin\omega t$.

3.70. Если в схему выпрямления переменного тока с помощью диода (рис. 3.20) включить вольтметр для измерения анодного напряжения плюсовым зажимом к аноду, то его стрелка резко отклонится влево от нуля (поэтому, чтобы стрелка не погнулась, такое включение делать не рекомендуется). Объяснить это явление.

3.71. В схеме, изображенной на рис. 3.21, источник дает синусоидальное переменное напряжение с действующим

значением 220 В. Какое напряжение покажет вольтметр магнитоэлектрической системы, включенный между анодом и катодом лампы? (Сопротивление вольтметра считать бесконечно большим.)

3.72. В схеме выпрямления, изображенной на рис. 3.19, генератор *Г* дает напряжение с действующим значением 500 В. Пригоден ли для этого выпрямителя кенотрон, у которого максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\,max}$=600 В?

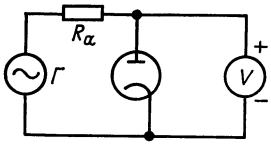


Рис. 3.20.

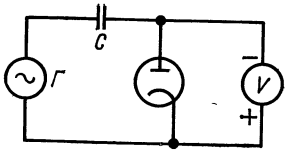


Рис. 3.21.

3.73. Пользуясь справочником, выбрать тип диода для получения в простейшей схеме выпрямления: а) выпрямленного тока 200 мА; б) выпрямленного напряжения 1200 В.

3.74. Однополупериодный выпрямитель, работающий без фильтра с резистором нагрузки $R_а$=5 кОм, должен давать выпрямленное напряжение $U_{ср}$=300 В. Подобрать подходящий тип кенотрона. Падением напряжения на проводящем кенотроне пренебречь.

Решение. 1. Определим максимальное значение импульса анодного тока

$$I_{max} \approx \pi I_{ср} = \pi U_{ср}/R_а = 3{,}14 \cdot 300/(5 \cdot 10^3) = 188 \text{ мА}.$$

2. Определим обратное напряжение

$$U_{обр} = \pi U_{ср} = 3{,}14 \cdot 300 = 942 \text{ В}.$$

3. Мощность, рассеиваемая анодом, пренебрежимо мала, так как в задаче не учитывается падение напряжения на кенотроне.

По найденным значениям I_{max} и $U_{обр}$ определим тип кенотрона — это 6Ц4П (I_{max}=300 мА, $U_{обр\,max}$=1000 В).

3.75. Двухполупериодный выпрямитель без фильтра (рис. 3.22) должен давать выпрямленное напряжение $U_{ср}$= =500 В на резисторе нагрузки $R_а$=5 кОм. Подобрать тип кенотрона, обеспечивающий этот режим, и определить коэффициент трансформации силового трансформатора, если напряжение питающей сети равно 127 В. Найти мощность, рассеиваемую на нагрузке.

Решение. Определяем среднее значение выпрямленного тока: $I_{ср}=U_{ср}/R_а=500/5000=100$ мА.

Амплитудное значение выпрямленного тока в однополупериодной схеме в π раз больше среднего значения выпрямленного тока, т. е. $I_{mа}=\pi I_{ср}$. Для двухполупериодной схемы это соотношение принимает вид:

$$I_{mа}=\pi/(2I_{ср})=\pi/(2\cdot 0{,}1)=0{,}157 \text{ А}.$$

Амплитуда выпрямленного напряжения

$$U_{mа}=\pi/(2U_{ср})=\pi/(2\cdot 500)=785 \text{ В}.$$

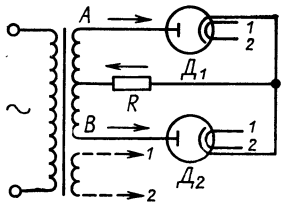


Рис. 3.22.

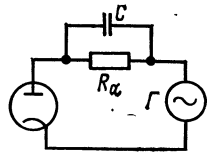


Рис. 3.23.

К запертому кенотрону приложено обратное напряжение всей вторичной обмотки трансформатора, т. е. $U_{обр}=2U_{mа}=2\cdot 785=1570$ В.

По полученным значениям $U_{обр}$, $I_{ср}$, $I_{mа}$ определим тип кенотрона — это 5Ц9С ($U_{обр\,max}=1700$ В; $I_{ср}=205$ мА, $I_{mа}=600$ мА).

Коэффициент трансформации трансформатора

$$K=2U_{mа}/(\sqrt{2}U)=2\cdot 785/(\sqrt{2}\cdot 127)=8{,}74.$$

Мощность, рассеиваемая в нагрузке,

$$P_н=U_{ср}I_{ср}=500\cdot 0{,}1=50 \text{ Вт}.$$

3.76. Объясните, что произойдет с кенотроном при коротком замыкании резистора нагрузки в анодной цепи.

3.77. Емкость анод — катод $C_{ак}$ диода равна 4 пФ, а его внутреннее сопротивление переменному току $R_i=500$ Ом. Найти сопротивление емкости $C_{ак}$ на частотах 400 Гц и 400 МГц. Начертить эквивалентную схему диода для переменного тока и выяснить, каково шунтирующее влияние емкости на этих частотах.

3.78. Определить частоту и длину волны электрических колебаний, начиная с которых в диоде следует учитывать инерцию электрона, если известно, что время пролета электрона до анода равно $\tau=10^{-9}$ с.

3.79. Схема выпрямления переменного тока с помощью диода показана на рис. 3.23. Какова должна быть емкость конденсатора C, чтобы он удовлетворительно сглаживал пульсации выпрямленного напряжения, если $R_а=2$ кОм, а частота генератора $Г$ в одном случае равна 50 Гц, а в другом 50 МГц?

Решение. Из условия $\tau_{разр}=CR_а \gg T=1/f$ ($\tau_{разр}$ — постоянная времени цепи разряда) для частоты $f=50$ Гц получаем:

$$C \gg \frac{1}{fR_а} = \frac{1}{50 \cdot 2 \cdot 10^3} = 10^{-5}\ Ф = 10\ мкФ.$$

Можно, например, выбрать $C=100$ мкФ, а для $f=50$ МГц емкость может быть в 10^6 раз меньше, т. е. 100 пФ.

3.80. Даны диоды: 2Д1С, 6Д6А, 6Д6А-В, 6Д3Д, 5Ц8С, 6Х2П, 6Х2П-Е, 6Х7Б, В1-0,02/20. Расшифруйте их маркировку, приведите примерные значения их параметров.

Глава четвертая

ТРИОДЫ

СТАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

4.1. Изобразить примерную кривую распределения потенциала между катодом и анодом в триоде для разных напряжений управляющей сетки и при постоянном положительном напряжении анода в направлениях «через виток» и «между витками» (в отсутствие и при наличии объемного заряда).

4.2. Изобразить примерную кривую распределения потенциала между катодом и анодом в триоде для разных анодных напряжений и постоянного отрицательного напря-

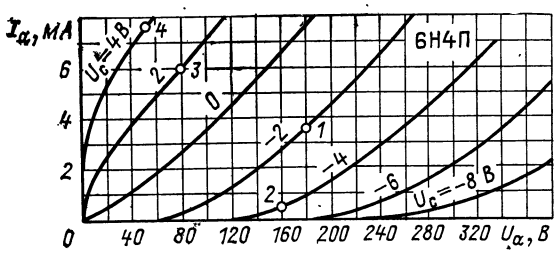


Рис. 4.1.

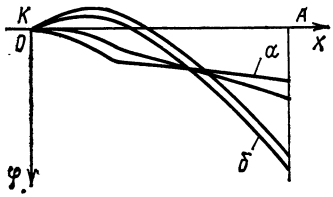


Рис. 4.2.

жения сетки в направлениях «через виток» и «между витками» (в отсутствие и при наличии объемного заряда).

4.3. На рис. 4.1 приведены статические анодные характеристики триода. Каким из четырех рабочих точек (*1—4*), указанных на характеристиках, соответствуют изображенные на рис. 4.2 потенциальные диаграммы *а* и *б*?

4.4. Изобразить распределение потенциала в плоскости сетки в триоде и объяснить по этому рисунку возможность образования «островков» на катоде. Как «островковый эффект» влияет на ход характеристик и параметры лампы?

4.5. Определить действующее напряжение в триоде при трех значениях отрицательного напряжения сетки (—1, —2 и —3 В), если анодное напряжение $U_а$=100 В, прямая проницаемость D=0,03. Поясните, от каких факторов зависит значение прямой проницаемости D.

4.6. Покажите, что прямая проницаемость D может быть выражена через междуэлектродные емкости триода.

4.7. Известно, что плотность катодного тока в триоде $j_к$=200 А/м² при напряжениях анода $U_а$=150 В и сетки $U_с$=—2 В. Определить прямую проницаемость D и статический коэффициент усиления триода μ, если расстояние между сеткой и катодом $r_{ск}$=0,6 мм.

4.8. Рассчитать и построить семейство анодных характеристик триода плоской конструкции, соответствующих напряжениям управляющей сетки $U_с$, равным 0, —2, —4 и —6 В. Известно, что площадь действующей поверхности анода $П$=4 см², расстояние между сеткой и катодом $r_{ск}$=0,2 см, расстояние между катодом и анодом $r_{ак}$=0,5 см, прямая проницаемость D=0,05.

4.9. Объясните, как по значению прямой проницаемости и одной из анодно-сеточных характеристик триода построить семейство его анодно-сеточных характеристик в области отрицательных сеточных напряжений.

4.10. По семейству анодных характеристик триода 6С1П, изображенному на рис. 4.3, построить семейство его анодно-сеточных характеристик для значений анодного напряжения 160, 220 и 280 В.

4.11. По семейству анодно-сеточных характеристик триода 6С34А, изображенному на рис. 4.4, построить семейство его анодных характеристик для значений напряжения сетки —1, —2, —3, —4 В.

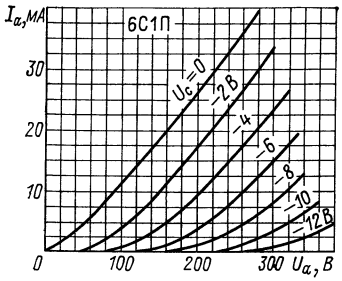


Рис. 4.3.

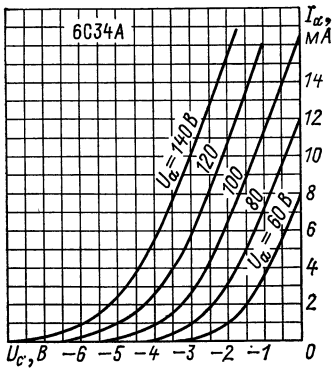


Рис. 4.4.

4.12. По семейству анодных характеристик триода 6Н4П (для одного триода), изображенному на рис. 4.1, построить его анодно-сеточную характеристику вначале для $U_а$=170 В, а затем, применяя метод сдвига характеристик, для $U_а$=200, 240 и 280 В.

4.13. Два триода имеют одинаковое расстояние между сеткой и анодом, но триод *В* имеет большее расстояние между катодом и сеткой, чем триод *А*. Все остальные конструктивные размеры этих триодов одинаковы. Чем будут отличаться характеристики этих триодов?

4.14. Объясните, почему в начальной области анодных характеристик триода при положительных напряжения сетки возрастание анодного напряжения вызывает сначала быстрый рост тока, а потом медленный?

4.15. Рассчитать и построить график зависимости отношения анодного тока к катодному $I_а/I_к$ от напряжения анода в интервале от 0 до 50 В при напряжениях сетки $U_с$= =±5 В для идеального триода, имеющего следующие геометрические размеры: расстояние катод—сетка $r_{кс}$=0,6 мм, расстояние сетка — анод $r_{са}$=1,2 мм, шаг сетки p=0,3 мм, диаметр проволоки d=0,1 мм, площадь поверхности каждого электрода $П$=2 см^2.

4.16. Почему анодный ток при положительно заряженной сетке и при постоянном анодном напряжении с увеличением сеточного напряжения сначала увеличивается, а потом начинает уменьшаться?

4.17. Даны два триода, различающиеся только конструкциями сеток. Сетка первой лампы сконструирована так, что лампа имеет статический коэффициент усиления μ больший, чем вторая. Если обе лампы работают при положительном напряжении сетки, равном анодному, то в пер-

вой лампе будет бо́льший сеточный ток, но ме́ньший катодный. Объясните это явление.

4.18. Изменение анодного тока $\Delta I_а=4$ мА получается в триоде либо путем изменения анодного напряжения $\Delta U_а=50$ В, либо путем изменения сеточного напряжения $\Delta U_с=1{,}25$ В. Определить крутизну характеристики S, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ.

4.19. При изменении напряжения сетки $U_с$ от —10 до +10 В анодный ток триода изменился от 0 до тока насыщения, равного 80 мА. Можно ли по этим данным определить крутизну характеристики?

4.20. Триод работает в режиме, при котором крутизна характеристики $S=3$ мА/В, внутреннее сопротивление $R_i=15$ кОм, сопротивление постоянному току $R_0=20$ кОм. Определить действующее напряжение триода, если мощность, рассеиваемая анодом, $P_а=1{,}8$ Вт и напряжение сетки $U_с=-2$ В.

4.21. Статический коэффициент усиления триода $\mu=50$. Если изменить напряжение сетки $U_с$ на 2 В, поддерживая анодное напряжение постоянным, то анодный ток изменится на 10 мА. На сколько вольт нужно изменить анодное напряжение, поддерживая сеточное напряжение постоянным, чтобы анодный ток изменился на 20 мА?

4.22. Найти примерные значения параметров триода: S, R_i и μ на основании приведенных ниже данных:

$I_а$, мА	3,0	4,0	4,0	4,6
$U_с$, В	—3	—3	—2	—2
$U_а$, В	200	225	185	200

4.23. Составьте схему, с помощью которой можно было бы снять статические характеристики и определить параметры триода. Каким образом можно определить статические параметры, используя схему, не снимая семейства статических характеристик?

4.24. Триод работает в режиме, при котором статический коэффициент усиления $\mu=20$, сопротивление постоянному току $R_0=30$ кОм, действующее напряжение $U_д=3$ В. Определить анодный ток и мощность, выделяемую на аноде.

4.25. Объяснить, почему статический коэффициент усиления триода зависит слабее от расстояния сетка — катод, чем крутизна S? Почему μ имеет максимальное значение при определенном отношении расстояния катод — сетка к расстоянию сетка — анод?

Как изменились бы параметры триода S, R_i и μ, если бы при прочих равных условиях сетка оказалась: а) более редкой; б) расположенной ближе к катоду?

4.26. Уравнение анодного тока триода имеет вид: $I_а=65\cdot10^{-6}(17U_с+U_а)+0{,}33\cdot10^{-6}(17U_с+U_а)^2$, где $I_а$ измеряется в амперах, а $U_с$ и $U_а$ в вольтах. Определить анодный ток $I_а$, внутреннее сопротивление R_i и крутизну характеристики S в рабочей точке при $U_с=-10$ В и $U_а=200$ В.

4.27. Вольт-амперная характеристика триода определяется следующим выражением: $I_а=0{,}00384(U_а+42{,}5U_с)^{3/2}$ мА. Требуется определить значения параметров лампы S, R_i и μ при анодном напряжении $U_а=300$ В и напряжении сетки $U_с=-4$ В.

4.28. Уравнение анодного тока триода имеет вид: $I_а=0{,}0125(U_а+21U_с)^{3/2}$ мА. Определить параметры лампы S, R_i и μ при анодном напряжении $U_а=100$ В и напряжении сетки $U_с=-2$ В.

4.29. Два триода, имеющие различные параметры, соединены параллельно. Параметры триодов следующие: $\mu_1=50$, $S_1=5$ мА/В; $\mu_2=20$, $S_2=2{,}5$ мА/В. Определить эквивалентные значения $S_{экв}$, $R_{iэкв}$ и $\mu_{экв}$ параллельного соединения триодов.

4.30. Триод имеет следующие параметры: статический коэффициент усиления $\mu=36$, крутизна $S=4$ мА/В. При анодном напряжении $U_а=150$ В и напряжении сетки $U_с=-3$ В анодный ток $I_а=3$ мА. На сколько вольт нужно изменить: а) напряжение сетки $U_с$, чтобы при данном анодном напряжении анодный ток увеличился вдвое? б) анодное напряжение, чтобы при постоянном напряжении $U_с$ анодный ток достиг исходного значения?

4.31. Из семейства анодных характеристик триода 6С1П, изображенного на рис. 4.3, определить: а) анодные напряжения, при которых напряжение сетки остается постоянным и равным нулю, если анодный ток изменяется от 17,5 до 22,5 мА; б) внутреннее сопротивление R_i.

4.32. Пользуясь семейством анодных характеристик триода 6С1П, изображенном на рис. 4.3, определить: а) на сколько вольт нужно изменить напряжение сетки, чтобы при постоянном и равном 160 В анодном напряжении анодный ток изменился от 7,5 до 15 мА; б) крутизну характеристики S.

4.33. По семейству анодных характеристик, изображенному на рис. 4.3, определить: а) рабочую точку, соответствующую напряжению сетки $U_с=-2$ В и анодному току $I_а=17{,}5$ мА; б) изменение анодного напряжения $\Delta U_а$, необходимое для того, чтобы анодный ток оставался постоян-

ным и равным 17,5 мА, если напряжение сетки изменяется от —1 до —3 В; в) статический коэффициент усиления μ.

4.34. По семейству анодных характеристик триода типа 6С1П (см. рис. 4.3) определить крутизну S, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ в рабочей точке при $U_а$=240 В и $U_с$=—4 В. Проверить правильность результатов расчета параметров. Построить также потенциальную диаграмму и определить значение действующего напряжения.

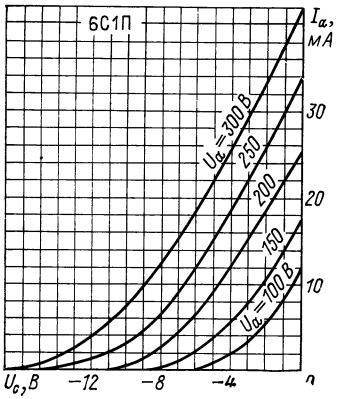


Рис. 4.5.

4.35. По семейству анодно-сеточных характеристик триода 6С1П (рис. 4.5) определить параметры S, R_i и μ в рабочей точке при $U_а$=200 В и $U_с$=—3 В. Проверить правильность результатов расчета параметров.

4.36. По семейству анодных характеристик триода типа 6С1П (см. рис. 4.3) для точек, соответствующих напряжению управляющей сетки $U_с$=—2 В и напряжениям анода, равным 100, 150, 200, 250 В, определить сопротивление триода постоянному току R_0 и сопротивление триода переменному току R_i, крутизну характеристики S и статический коэффициент усиления μ. Построить графики зависимости: $R_0=f(U_а)$, $S=f(U_а)$, $R_i=f(U_а)$. Объяснить эти зависимости.

4.37. По семейству анодно-сеточных характеристик триода 6С34А (рис. 4.4) определить крутизну характеристики S, сопротивление постоянному току триода R_0, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ для точек, соответствующих анодному напряжению $U_а$=120 В и напряжениям сетки, равным —2, —3, —3,5 и —4,5 В. Построить графики зависимости параметров триода от напряжения на сетке $S=f(U_с)$, $R_0=f(U_с)$, $R_i=f(U_с)$, $\mu=f(U_с)$. Объяснить эти зависимости.

4.38*. Известно, что при анодном напряжении $U_а$=200 В триод запирается при напряжении сетки $U_{с.зап}$=—8 В. Определить внутреннее сопротивление R_i, если крутизна S=2 мА/В.

4.39*. Статический коэффициент усиления триода μ=

* «Островковым эффектом» пренебречь, считая, что в триоде выполняется закон «степени $^3/_2$».

=30. При каком анодном напряжении появится анодный ток, если напряжение сетки U_c=—8 В?

4.40 *. Крутизна характеристики S=7 мА/В, внутреннее сопротивление R_i=3,2 кОм, анодное напряжение U_a= =200 В. Определить: а) статический коэффициент усиления μ, напряжение запирания лампы $U_{c.зап}$; б) на сколько вольт нужно уменьшить анодное напряжение, чтобы анодно-сеточная характеристика сдвинулась вправо на 2 В?

4.41 *. Крутизна характеристики триода S=5 мА/В. Известно, что при анодном напряжении U_a=100 В лампа запирается при напряжении сетки $U_{c.зап}$=—4 В. Определить: а) внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ; б) на сколько вольт (и в какую сторону) сместится анодно-сеточная характеристика, если анодное напряжение увеличится на 100 В?

4.42 *. Известно, что триод запирается при напряжении сетки $U_{c.зап}$=—10 В. Известно также, что статический коэффициент усиления триода μ=30 и что при изменении напряжения сетки на 2 В анодный ток изменяется на 6 мА. Определить: а) параметры S и R_i; б) при каком анодном напряжении снималась анодно-сеточная характеристика?

4.43 *. Дана анодная характеристика триода, снятая при напряжении сетки U_c=—2 В. Известно, что статический коэффициент усиления этого триода μ=20 и что при изменении напряжения анода на 20 В анодный ток изменится на 2 мА. Определить: а) крутизну S и внутреннее сопротивление R_i; б) чему равно напряжение запирания анода $U_{a.зап}$?

4.44 *. Даны две анодно-сеточные характеристики триода, снятые при U_{a1}=80 В и при U_{a2}=120 В. Статический коэффициент усиления этого триода μ=20. Определить: а) напряжение запирания для каждой из характеристик $U_{c\ зап1}$ и $U_{c.зап2}$; б) напряжение сдвига.

4.45 *. Крутизна характеристики триода S=4,5 мА/В, внутреннее сопротивление R_i=8 кОм. Анодно-сеточную характеристику этого триода нужно сдвинуть на 2 В. На сколько вольт нужно для этого изменить анодное напряжение?

4.46 *. Даны два триода: триод для усиления напряжения и триод для усиления мощности. Статический коэффициент усиления первого триода μ_1=100, второго μ_2=10. Оба триода работают при одинаковых анодных напряжениях U_a=200 В. Определить: а) чему равно напряжение запирания каждого триода; б) как различается напряжение сдвига анодно-сеточных характеристик обоих триодов;

в) почему триоды для усиления мощности приходится изготовлять с небольшим μ; г) какие конструктивные особенности сетки обеспечивают малый статический коэффициент усиления μ.

4.47. На рис. 4.6 приведена схема для измерения обратного сеточного тока. Показать, что сеточный ток можно определить по формуле $I_c = \Delta I_a/(SR_c)$, где S — крутизна анодно-сеточной характеристики; ΔI_a — изменение анодного тока при замыкании ключа.

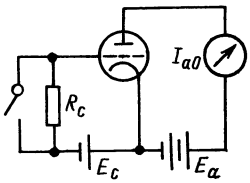


Рис. 4.6.

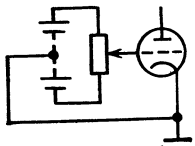


Рис. 4.7.

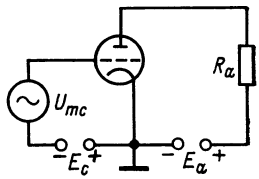


Рис. 4.8.

4.48. Как изменится анодный ток в триоде, если в цепь сетки, находящейся под отрицательным потенциалом, включить резистор с сопротивлением порядка нескольких сотен ом?

4.49. Для снятия характеристик триода цепь его управляющей сетки собрана так, как показано на рис. 4.7. Объяснить, почему при установке ползунка потенциометра точно на середину напряжение сетки несколько отличается от нуля?

4.50. Триод 1С12П имеет катод прямого накала. Источник напряжения смещения сетки можно подключить к положительному или отрицательному полюсу батареи накала. Нарисуйте эти схемы питания. Поясните, одинаков ли будет анодный ток в этих схемах при прочих равных условиях.

4.51. В цепь сетки включен резистор с сопротивлением R_c=200 кОм. Напряжение источника смещения E_c=—4 В. Напряжение анода U_a=200 В, обратный ток сетки $I_{c.обр}$= =2 мкА. Определить: а) напряжение сетки; б) как изменится анодный ток, если в цепь сетки вместо указанного резистора включить резистор с сопротивлением 2 МОм.

РАБОЧИЙ РЕЖИМ

Графо-аналитический расчет рабочего режима

4.52. Триод 6С1П включен в схему, изображенную на рис. 4.8. Напряжение источника питания анодной цепи E_a=

=300 В, сопротивление резистора нагрузки $R_а$=5 кОм, амплитуда синусоидального входного сигнала U_{mc}=3 В. Пользуясь семейством анодно-сеточных характеристик, изображенным на рис. 4.5, для напряжений смещения E_c — 3, —6 и —9 В требуется: а) построить временные диаграммы анодного тока и входного напряжения; б) найти координаты рабочей точки ($I_{а0}$, $U_{а0}$, E_c); в) графическим путем определить максимальные и минимальные значения анодного тока и амплитуды переменных составляющих анодного тока; г) объяснить, почему амплитуды переменных составляющих анодного тока получились различными; каким образом выбор рабочей точки влияет на усиление сигнала; д) произвести качественную оценку степени нелинейных искажений.

4.53. Докажите, что при сопротивлении нагрузки в анодной цепи $R_а$=0 мощность, рассеиваемая анодом, равна подводимой к лампе мощности и остается неизменной как в режиме покоя, так и в режиме усиления класса А. Покажите, что в самом общем случае, когда в анодную цепь включена комплексная нагрузка $Z=R_а+jX_а$: а) мощность, подводимая к лампе, остается постоянной как в режиме покоя, так и в режиме усиления класса А; б) мощность, рассеиваемая анодом, в режиме покоя больше, чем в режиме усиления класса А; в) мощность, рассеиваемая на нагрузке, при наличии колебаний возрастает.

Решение. Известно, что мгновенное значение анодного тока

$$I_а=I_{а0}+I_{ma}\sin\omega t.$$

Этот ток создается батареей, напряжение которой равно $E_а$. Следовательно, мощность, развиваемая источником анодного питания за период T,

$$P_0=\frac{1}{T}\int_0^T E_а I_а dt=\frac{1}{T}\int_0^T E_а I_{а0} dt+\frac{1}{T}\int_0^T E_а I_{ma}\sin\omega t\ dt.$$

Анодный ток $I_а$, протекая через нагрузку, создает на ней падение напряжения

$$U_z=I_а Z_а=I_{а0}R_а+I_{ma}Z_а\sin\omega t=$$
$$=I_{а0}R_а+U_{ma}\sin(\omega t+\varphi),$$

где $\varphi=\operatorname{arctg}(X_а/R_а)$.

Мощность, рассеиваемая во внешней нагрузке,

$$P_R=\frac{1}{T}\int_0^T I_a U_z dt=\frac{1}{T}\int_0^T [I_{a0}+I_{ma}\sin\omega t]\,[I_{a0}R_a+U_{ma}\sin(\omega t+\varphi)]\,dt=$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T I^2_{a0}R_a dt+\int_0^T I_{ma}U_{ma}\sin\omega t\sin(\omega t+\varphi)\,dt=$$

$$=I^2_{a0}R_a+\frac{I_{ma}U_{ma}}{2}\cos\varphi,$$

где $P_{R0}=I^2_{a0}R_a$ — мощность, рассеиваемая на нагрузке постоянной составляющей анодного тока; $P_{вых}=I_{ma}U_{ma}\times\times\cos\varphi/2$ — мощность, выделяемая на нагрузке переменной составляющей анодного тока.

В любой момент времени мгновенное значение анодного напряжения $U_a=E_a-U_z=I_aR_a-U_{ma}\sin(\omega t+\varphi)$, следовательно, мощность, рассеиваемая на аноде,

$$P_a=\frac{1}{T}\int_0^T I_a U_a dt=$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T [I_{a0}+I_{ma}\sin\omega t]\,[E_a-I_{a0}R_a-U_{ma}\sin(\omega t+\varphi)]=$$

$$=I_{a0}E_a-I^2_{a0}R_a-\frac{I_{ma}U_{ma}}{2}\cos\varphi.$$

Нетрудно заметить, что полная мощность, потребляемая анодной цепью,

$$P_0=P_a+P_R=\text{const}, \text{ и если } P_R=0, \text{ то } P_a=P_0.$$

4.54. Триод 6С1П работает в схеме усиления напряжения (рис. 4.8). Напряжение источника питания анодной цепи $E_a=300$ В. Для сопротивлений резисторов нагрузки R_a, равных 5, 10, 25 и 50 кОм, определить: а) анодный ток, анодное напряжение и напряжение на нагрузке при напряжении смещения $E_c=-2$ В; б) сопротивление нагрузки, при котором рабочая точка соответствует $I_{a0}=7{,}5$ мА, $E_c=-4$ В при $E_a=260$ В. Анодные характеристики триода изображены на рис. 4.3.

4.55. По семейству статических анодно-сеточных характеристик триода 6С34А (см. рис. 4.4) построить рабочую анодно-сеточную характеристику, если напряжение

источника питания анодной цепи $E_а$=140 В и сопротивление резистора нагрузки $R_а$=10 кОм.

4.56. Используя анодные характеристики триода 6С1П, изображенные на рис. 4.3, построить рабочие анодно-сеточные характеристики для сопротивлений нагрузки $R_а$, равных 0, 10, 15, 25 кОм, и напряжения источника питания анодной цепи $E_а$=250 В.

4.57. Пользуясь справочником, на семействах анодных и анодно-сеточных характеристик триода 6Н14П указать рабочую область, для чего провести линии: а) ограничивающую возможность появления искажений из-за нелинейности характеристик; б) ограничивающую возможность появления сеточных токов; в) максимально допустимой мощности, рассеиваемой анодом.

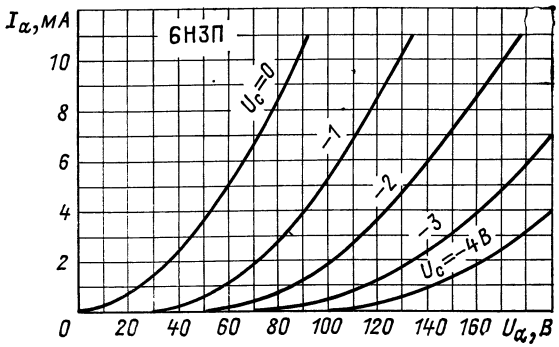


Рис. 4.9.

4.58. Одна половина двойного триода 6Н3П работает в усилительном каскаде. Напряжение источника анодного питания $E_а$=180 В, напряжение смещения E_c=—2 В, сопротивление резистора анодной нагрузки $R_а$=20 кОм. Амплитуда напряжения сигнала $U_{mа}$=1,5 В. Пользуясь семейством анодных характеристик триода, изображенных на рис. 4.9, определить постоянную составляющую анодного тока $I_{а0}$, амплитуду переменной составляющей анодного тока $I_{mа}$, постоянную составляющую анодного напряжения $U_{а0}$, амплитуду переменной составляющей анодного напряжения $U_{mа}$, выходную мощность $P_{вых}$ и мощность $P_а$, рассеиваемую анодом. Выяснить, допустим ли такой режим работы, если максимально допустимая мощность, рассеиваемая анодом, $P_{аmax}$=1,8 Вт?

4.59. Триод 6С51Н работает в схеме усиления напряжения. Напряжение источника питания анодной цепи $E_а$=

5.32. Как изменятся параметры пентода S, R_i и μ и его междуэлектродные емкости, если управляющую сетку поместить несколько дальше от катода?

Рабочий режим

5.33. Пентод 6Ж4П (рис. 5.8) включен в схему, изображенную на рис. 5.9. Напряжение источника анодного питания $E_а$=300 В; напряжение источника питания экранирующей сетки E_{c2}=150 В; напряжение смещения E_{c1}=—2 В и сопротивление резистора нагрузки $R_а$=20 кОм. На управляющую сетку подается синусоидальный сигнал с амплитудой U_{mc}=0,5 В. Определить: а) амплитуду переменной составляющей анодного тока; б) рабочую крутизну; в) коэффициент усиления каскада по модулю. Построить временные диаграммы анодного тока и анодного напряжения. Построить рабочую анодно-сеточную характеристику и использовать ее для проверки результатов задачи.

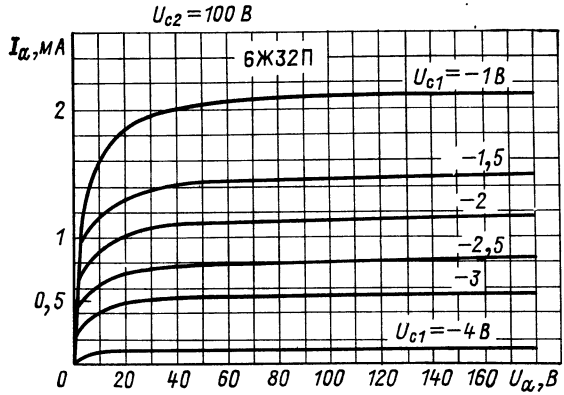


Рис. 5.7.

5.34. Тетрод работает в усилительном каскаде. Постоянная составляющая анодного напряжения U_{a0}=200 В; постоянная составляющая напряжения экранирующей сетки U_{c20}=100 В. На сетку подается сигнал с амплитудой U_{mc}=3 В. Коэффициент усиления каскада по модулю $|K|$=40. Будет ли в этом каскаде наблюдаться динатронный эффект?

5.35. Лучевой тетрод 6П6С (рис. 5.10) работает в усилительном каскаде. Напряжение источника анодного питания $E_а$=250 В; напряжение экранирующей сетки U_{c20}=250 В; напряжение сигнала U_{mc}=8 В; напряжение смещения E_{c1}=—10 В; сопротивление резистора нагрузки

в анодной цепи $R_а$=2 кОм. С помощью анодных характеристик найти: а) постоянные составляющие анодного тока $I_{а0}$, анодного напряжения $U_{а0}$ и напряжения на нагрузке U_{R0}; б) амплитуды переменных составляющих анодного тока I_{ma}, анодного напряжения U_{ma}; в) выходную мощность $P_{вых}$, мощность P_{R0}, рассеиваемую на нагрузке постоянной составляющей анодного тока, мощность $P_{а0}$, рассеиваемую анодом в режиме покоя, полную потребляемую мощность в анодной цепи P_0; г) коэффициент усиления каскада по модулю K и рабочую крутизну $S_{раб}$; д) КПД анодной цепи. Выяснить, допустим ли данный режим по мощности, рассеиваемой анодом, если P_{amax}=13,2 Вт.

5.36. Пентод 6Ж4 работает в режиме усиления. Напряжение источника анодного питания $E_а$=320 В, напряжение экранирующей сетки E_{c20}=150 В, напряжение смещения E_{c1}=—1,5 В, амплитуда сигнала U_{mc}=1 В. Пользуясь семейством анодных характеристик, изображенных на рис. 5.3, определить: а) оптимальное сопротивление нагрузки

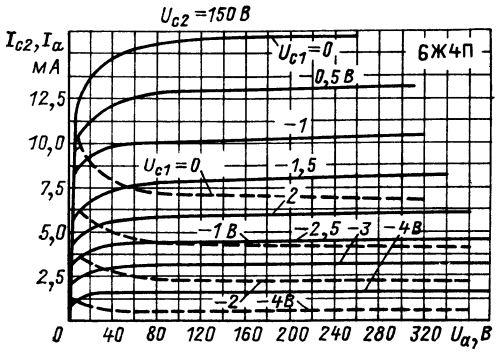


Рис. 5.8.

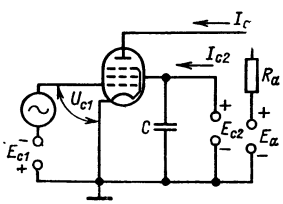


Рис. 5.9.

анодной цепи $R_{а.опт}$; б) постоянную составляющую анодного тока $I_{а0}$; постоянную составляющую анодного напряжения $U_{а0}$; постоянную составляющую падения напряжения на нагрузке U_{R0}; в) амплитуды переменной составляющей анодного тока I_{ma} и напряжения на нагрузке U_{ma}; г) выходную мощность $P_{вых}$, мощность P_0, подводимую к анодной цепи, мощность $P_{а0}$, рассеиваемую анодом; д) коэффициент усиления каскада K, рабочую крутизну $S_{раб}$; е) КПД анодной цепи. Выяснить, допустим ли данный режим по мощности, если P_{amax}=3,3 Вт.

5.37. Для условий, сформулированных в задаче 5.36, рассчитать коэффициент усиления каскада через: а) стати-

=100 В, напряжение смещения E_c=—2,5 В. Требуется определить: напряжение анода U_{a0} и напряжение на нагрузке U_{R0} при сопротивлениях резисторов нагрузки R_a, равных 0, 5, 10 и 15 кОм; амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma} и модуль коэффициента усиления каскада K для каждого из резисторов, если амплитуда синусоидального входного сигнала U_{mc}=1 В. Анодные характеристики триода даны в справочнике.

4.60. Триод 6С51Н, анодные характеристики которого даны в справочнике, работает в усилительном каскаде. Сопротивление резистора нагрузки в анодной цепи R_a= =8 кОм. Напряжение источника питания в анодной цепи E_a=100 В, напряжение смещения E_c=—1,5 В. В цепь сетки включен источник переменного синусоидального напряжения с амплитудой U_{mc}=1 В. Построить нагрузочную характеристику и определить: а) выходную мощность $P_{вых}$, выделяемую на нагрузке; б) мощность P_{R0}, выделяемую на нагрузке постоянной составляющей анодного тока; в) мощность P_a, выделяемую на аноде; г) полную мощность P_0, потребляемую в анодной цепи; д) КПД анодной цепи; е) площади в семействе анодных характеристик, соответствующие указанным мощностям.

4.61. Произвести те же вычисления, что и в задаче 4.60, при условии, что напряжение источника питания анодной цепи E_a=120 В. Объяснить, почему в этом случае КПД ниже?

4.62. Триод 6С53Н включен в схему усилительного каскада. Напряжение источника питания анодной цепи E_a= =150 В, напряжение смещения E_c=—1,5 В, амплитуда входного сигнала U_{mc}=1,5 В. Пользуясь справочником, по семейству анодных характеристик триода требуется: а) определить выходные мощности, если в анодную цепь включены резисторы с сопротивлениями 7,5; 15; 20 и 30 кОм; б) построить график зависимости выходной мощности от сопротивления нагрузки; в) определить, при какой нагрузке нелинейные искажения будут минимальны.

4.63. Триод 6С1П работает в схеме усилителя с активной нагрузкой R_a в анодной цепи при напряжении источника анодного питания E_a=300 В. Пользуясь семейством анодных характеристик триода (см. рис. 4.3), при условии получения от триода наибольшей выходной мощности при минимальных искажениях в безопасном для триода режиме определить: а) сопротивление резистора R_a; б) напряжение смещения E_c; в) амплитуду входного сигнала U_{mc}; г) постоянную составляющую анодного тока I_{a0}; д) амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}; е) ам-

плитуду переменной составляющей напряжения на нагрузке U_{mR}; ж) модуль коэффициента усиления каскада K; з) выходную мощность $P_{вых}$, мощность, выделяемую в нагрузке постоянной составляющей анодного тока, P_{R0}; и) мощность, рассеиваемую анодом; к) КПД анодной цепи.

Решение. 1. На семейство статических анодных характеристик наносим линию максимально допустимой мощности, рассеиваемой анодом, P_{amax} (у триода 6С1П максимально допустимая мощность P_{amax}=1,8 Вт, рис. 4.10). Для

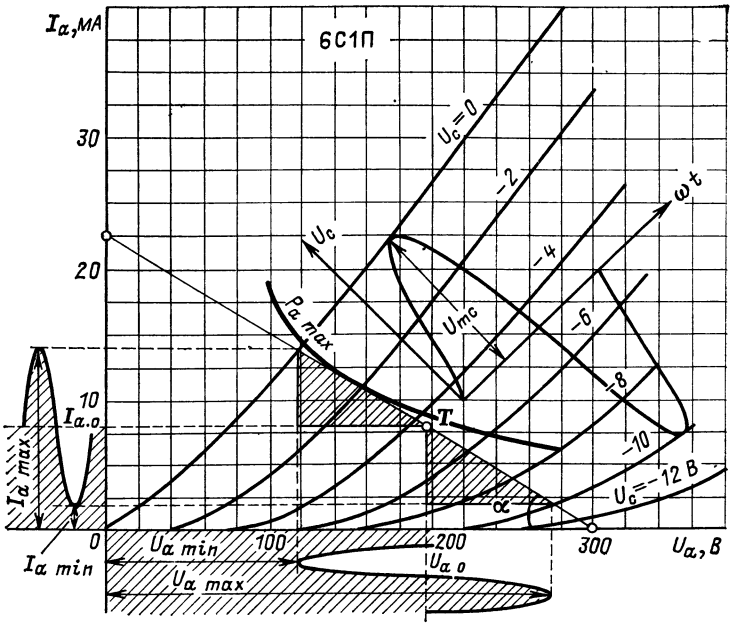


Рис. 4.10.

этого, задаваясь значениями анодного напряжения U_a, определяем максимально допустимый анодный ток $I_{amax}=P_{amax}/U_a$. Результаты расчета приведены ниже:

U_a, В	320	300	280	260	240	220	200	180	160	140
$I_{a\,max}$, мА	5,6	6	6,4	6,95	7,5	8,2	9	10	11,3	12,9

2. Для выполнения условия получения максимальной выходной мощности линию нагрузки на семействе анодных характеристик следует провести таким образом, чтобы площади нагрузочных треугольников были наибольшими, а для этого наклон линии нагрузки следует выбрать достаточно большим. При этом нельзя допустить, чтобы точки

ческую крутизну; б) через рабочую крутизну $S_{раб}$. Оценить погрешность. Показать, что происходит со значением погрешности при увеличении $R_а/R_i$.

5.38. Для оконечного пентода низкой частоты 6П18П, работающего с активной нагрузкой $R_а$=2,5 кОм, исходя из условия получения от пентода наибольшей мощности при минимальных искажениях в безопасном для него режиме, определить: а) напряжение источника питания анодной

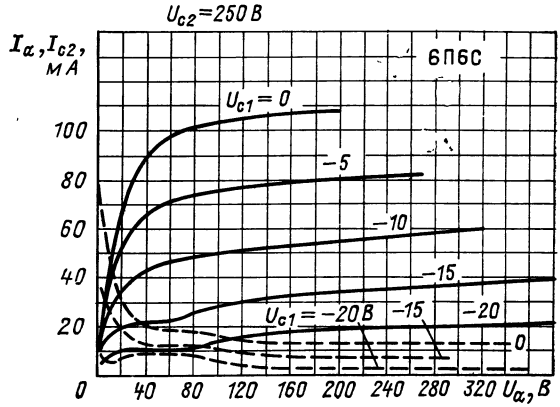


Рис. 5.10.

цепи $E_а$, напряжение смещения E_{c1}; б) амплитуду сигнала U_{mc}; в) постоянную составляющую анодного тока I_{a0}; амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}; г) постоянную составляющую анодного напряжения U_{a0}; амплитуду переменного напряжения на нагрузке U_{mR}; д) выходную мощность $P_{вых}$; мощность P_{a0}, рассеиваемую анодом в режиме покоя; полную потребляемую мощность в анодной цепи P_0; е) рабочую крутизну $S_{раб}$, коэффициент усиления каскада K, КПД анодной цепи. Минимальный ток I_{amin}, определяющий искажения на нижних участках характеристик, принять равным 8 мА. Характеристики пентода взять из справочника.

5.39. Решить задачу 5.38 при условии, что используется лампа 6П18П с активной нагрузкой в анодной цепи $R_а$= =5 кОм, шунтированной дросселем. Параметры дросселя: $L_{др}=\infty$, $r_{др}=0$.

5.40. Лучевой тетрод 6П1П (рис. 5.11) работает в режиме усиления, причем нагрузкой служит резистор, шунтированный дросселем, параметры которого $L_{др}=\infty$ и $r_{др}=0$.

Пользуясь семейством статических анодных характеристик (см. справочник), построить рабочую характеристику для заданных $R_а$=2,5 кОм и E_{c1}=—12,5 В. По полученной рабочей характеристике определить: а) амплитуду переменного напряжения сетки; б) постоянную составляющую анодного тока I_{a0}, амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}; в) амплитуду переменного напряжения на нагрузке U_{mR}; г) рабочую крутизну $S_{раб}$ и коэффициент усиления каскада K; д) выходную мощность $P_{вых}$ и мощность $P_а$, рассеиваемую анодом; е) КПД анодной цепи.

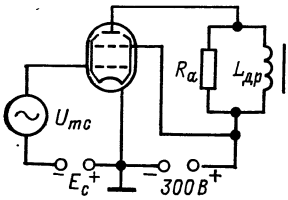


Рис. 5.11.

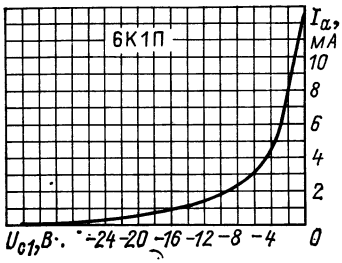


Рис. 5.12.

Выяснить, допустим ли заданный режим по мощности, если максимально допустимая мощность, рассеиваемая анодом, P_{amax}=12 Вт, напряжение источника анодного питания $E_а$=300 В. Характеристики тетрода приведены в справочнике.

5.41. Пользуясь справочником, найти сопротивление автоматического смещения пентода 6Ж10П, если при анодном напряжении U_{a0}=150 В и напряжении экранирующей сетки U_{c20}=100 В необходимо получить напряжение смещения, равное минус 1 В.

5.42. В усилительном пентоде напряжение экранирующей сетки U_{c20}=120 В, напряжение источника анодного питания $E_а$=300 В, напряжение автоматического смещения равно минус 1,5 В. Значения анодного тока и тока второй сетки в режиме покоя равны соответственно 1,3 и 0,2 мА. Питание экранирующей сетки осуществляется через резистор. Определить сопротивления резисторов в цепи автоматического смещения и в цепи второй сетки.

5.43. Пентод 6К1П (рис. 5.12) работает в каскаде УВЧ. Резонансное сопротивление контура $R_э$=20 кОм. Найти коэффициенты усиления каскада по модулю для случаев: а) при приеме сильных сигналов (U_{mc}=4 В), если напря-

линии нагрузки перешли за линию максимально допустимой мощности. Выбрав из указанных соображений наклон линии нагрузки и проведя ее из точки на оси абсцисс $U_a = E_a = 300$ В, найдем R_a. В данном случае $R_a = E_a/I_a = 300/(22{,}5 \cdot 10^{-3}) \approx 13$ кОм.

3. Перейдем к выбору рабочего участка и рабочей точки, исходя из условия задачи о получении наибольшей мощности при минимальных искажениях. Рабочий участок с одной стороны ограничивается точкой пересечения линии нагрузки со статической характеристикой, снятой при напряжении сетки $U_c = 0$ (условие работы без сеточных токов), а с другой — точкой пересечения линии нагрузки с прямой линией, проведенной параллельно оси абсцисс на уровне I_{amin} (ниже этой линии располагаются криволинейные участки характеристики). Возьмем $I_{amin} = 2$ мА.

4. Выберем рабочую точку, т. е. определим напряжение смещения E_c. Для получения наибольшей выходной мощности необходимо использовать весь рабочий участок нагрузочной характеристики. Для этого рабочую точку расположим посередине рабочего участка, причем середину надо выбирать не геометрическую, а по сеточному напряжению. Берем напряжение смещения E_c равным половине значения сеточного напряжения U_c, соответствующего статической анодной характеристике, проходящей через точку пересечения нагрузочной линии с линией минимального анодного тока I_{amin}. В данном случае $U_c = -10$ В. Следовательно, напряжение смещения $E_c = -5$ В.

Проекция рабочей точки на ось ординат определит значение тока покоя $I_{a0} = 8$ мА, а на ось абсцисс — значение постоянной составляющей анодного напряжения $U_{a0} = 196$ В. На этом же графике можно определить падение напряжения на нагрузке от постоянной составляющей анодного тока: $U_{R0} = E_a - U_{a0} = 300 - 196 = 104$ В.

5. Выберем амплитуду переменного напряжения сигнала. Для получения наибольшей выходной мощности выгодно выбрать амплитуду переменного напряжения сигнала U_{mc} близкой к абсолютному значению напряжения смещения E_c. Возьмем $U_{mc} = 5$ В.

6. Построим треугольники полезной мощности и определим по ним остальные неизвестные величины, требуемые в условии задачи. Поскольку характеристики ламп нелинейны, то усиление всегда сопровождается искажениями (одинаковому изменению полуволн переменного напряжения на сетке соответствуют неодинаковые изменения переменной составляющей анодного тока, а следовательно, и напряжений на нагрузке и аноде). Поэтому значения ам-

плитуд переменных составляющих анодного тока и анодного напряжения следует определять как средние, т. е. в рассматриваемом случае

$$I_{ma}=(I_{amax}-I_{amin})/2=(14-2)/2=6 \text{ мА},$$

где $I_{a\,max}$ и $I_{a\,min}$ — соответственно максимальное и минимальное значения анодного тока.

Аналогично определяем амплитуду переменного напряжения на аноде:

$$U_{ma}=U_{mR}=(U_{amax}-U_{amin})/2=(276-118)/2=78 \text{ В},$$

где U_{amax} и U_{amin} соответственно максимальное и минимальное значения анодного напряжения. Дальнейший расчет приведен ниже.

Коэффициент усиления каскада по модулю

$$|K|=U_{ma}/U_{mc}=78/5\approx16.$$

Выходная мощность

$$P_{\text{вых}}=0{,}5I_{ma}U_{ma}=0{,}5\cdot6\cdot10^{-3}\cdot78=0{,}234 \text{ Вт}.$$

Мощность, выделяемая на нагрузке постоянной составляющей анодного тока,

$$P_{R0}=I_{a0}U_{R0}=8\cdot10^{-3}\cdot104=0{,}832 \text{ Вт}.$$

Полная потребляемая мощность в анодной цепи

$$P_0=I_{a0}E_a=8\cdot10^{-3}\cdot300=2{,}4 \text{ Вт}.$$

Мощность, рассеиваемая анодом,

$$P_a=P_0-P_{R0}-P_{\text{вых}}=2{,}4-0{,}832-0{,}234=1{,}33 \text{ Вт}.$$

В рассматриваемом случае $P_a<P_{amax}=1{,}8$ Вт, т. е. работа происходит в безопасном режиме.

Коэффициент полезного действия анодной цепи в процентах

$$\eta=(P_{\text{вых}}\cdot100)/P_0=(0{,}234\cdot100)/2{,}4=9{,}8\%.$$

Обращает на себя внимание сравнительно низкий КПД усилителя на триоде с активной нагрузкой в анодной цепи даже в условиях оптимального режима усиления.

4.64. Решить предыдущую задачу, если используется лампа 6Н1П при напряжении источника питания анодной цепи $E_a=300$ В. Анодные характеристики приведены в справочнике.

4.65. Триод 6Н1П работает в схеме усиления с активной нагрузкой в анодной цепи. Напряжение источника анодного питания $E_a=300$ В. Требуется: а) выбрать сопротивление резистора R_a и рабочую точку, стремясь получить

жение смещения E_c=—20 В; б) при приеме слабых сигналов (U_{mc}=0,1 В), если E_c=—2 В. Определить амплитуды выходного напряжения $U_{m\text{вых}}$ в обоих случаях.

5.44. Пользуясь справочником, определить, во сколько раз большее усиление можно получить на крутом участке анодно-сеточной характеристики пентода по сравнению с пологим, если используется пентод 6К8П.

5.45. Начертить схему замещения анодной цепи усилительного каскада с пентодом. Внутреннее сопротивление пентода R_i=900 кОм, сопротивление резистора анодной нагрузки R_a=100 кОм, напряжение сигнала U_c=0,6 В (действующее значение), коэффициент усиления каскада по модулю $|K|$=225. Требуется определить: а) действующее значение тока в схеме замещения с генератором тока, крутизну S; б) проверить значение крутизны, пользуясь схемой замещения с генератором напряжения.

5.46. Пентод имеет параметры: S=4,5 мА/В, R_i= =1,5 МОм. Напряжение на выходе должно равняться 40 В при переменной составляющей анодного тока I_{ma}=0,2 мА. Определить: а) каково должно быть напряжение сигнала U_{mc}? б) какая получится погрешность в процентах при определении этого напряжения, если пользоваться приближенной схемой замещения, полагая $R_i=\infty$?

5.47. Лучевой тетрод 6П23П работает в типовом режиме. Сопротивление резистора нагрузки R_a=5 кОм, амплитуда подводимого к сетке напряжения U_{mc}=6 В. Аналитически определить: а) коэффициент усиления каскада K; б) рабочую крутизну $S_{\text{раб}}$; в) амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}; г) выходную мощность $P_{\text{вых}}$.

5.48. Оконечный пентод 6П18П имеет в рабочей точке крутизну S=11 мА/В, внутреннее сопротивление R_i= =22 кОм. Определить: а) рабочую крутизну при индуктивном нагрузочном сопротивлении 5 Ом; б) амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}, если к сетке лампы подведено переменное напряжение с амплитудой U_{mc}= =2 В; в) амплитуду переменного напряжения в анодной цепи лампы U_{ma}.

5.49. Пентод 6К7Б имеет в рабочей точке статическую крутизну S=1,45 мА/В и внутреннее сопротивление R_i= =827 кОм. Определить: а) статический коэффициент усиления μ; б) коэффициент усиления каскада K, если в анодную цепь лампы включен настроенный в резонанс контур, имеющий индуктивность L=10 мкГн, емкость C=50 пФ и сопротивление потерь r=20 Ом.

5.50. Оконечный триод 6С4С и пентод 6П15П имеют следующие параметры: триод: S=5,4 мА/В, R_i=840 Ом; пентод: S=14,7 мА/В, R_i=100 кОм. Определить амплитуды напряжений, которые надо подать на сетку каждой из ламп, необходимые для получения выходной мощности 1 Вт, если сопротивление резистора нагрузки $R_а$=4 кОм.

5.51. Пользуясь справочником, определить коэффициент усиления каскада по модулю с пентодом 6Ж49П-Д, работающим в типовом режиме, если сопротивление резистора нагрузки в анодной цепи $R_а$=20 кОм.

5.52. а) Сравнить модули коэффициентов усиления каскадов, которые можно получить в случае использования ламп 6С28Б (триод), 6Э6П-Е (тетрод) и 6Ж9П (пентод) при номинальных напряжениях электродов и при сопротивлении нагрузки, равном 20 кОм; б) определить сопротивление нагрузки, необходимое для получения в случае использования каждой из этих ламп коэффициента усиления каскада по модулю, равного половине статического коэффициента усиления соответствующей лампы. Параметры лампы взять из справочника.

5.53. Пентод имеет следующие междуэлектродные емкости: $C_{ас1}$=0,005 пФ, $C_{ак}=C_{ас2}=C_{ас3}$=7 пФ, $C_{с1к}=C_{с1с2}=C_{с1с3}$=6 пФ. Определить входную и выходную емкости, а также входное и выходное сопротивления на частоте f=20 МГц, считая внутреннее сопротивление пентода $R_i \to \infty$.

5.54. Пентод работает в усилительном каскаде. Сопротивление нагрузки $R_а$=25 кОм, крутизна в рабочей точке S=2 мА/В, внутреннее сопротивление R_i=0,7 МОм, проходная емкость $C_{ас1}$=0,005 пФ, входная емкость $C_{вх}$=6 пФ и выходная емкость $C_{вых}$=7 пФ. Определить входную рабочую емкость усилителя.

5.55. Пентод, рассмотренный в предыдущей задаче, в триодном включении имеет следующие параметры: статический коэффициент усиления μ=20, внутреннее сопротивление R_i=7 кОм, проходная емкость $C_{ас}$=2,8 пФ, входная емкость $C_{ск}$=3,4 пФ, выходная емкость $C_{ак}$=11 пФ. Определить входную рабочую емкость усилителя при сопротивлении резистора нагрузки $R_а$=25 кОм и сравнить ее с емкостью, полученной при решении задачи 5.54.

5.56. Пентод 6Ж3П работает в качестве усилителя с нагрузкой в анодной цепи $R_а$=22 кОм. Крутизна S=5 мА/В, внутреннее сопротивление R_i=0,75 МОм, входная емкость $C_{вх}$=6,5 пФ, проходная емкость $C_{ас1}$=0,005 пФ. Определить входное сопротивление этой лампы на частоте 150 МГц.

5.57. Пентод 6Ж8 работает в усилительном каскаде. На

возможно большую амплитуду выходного напряжения и малые искажения усиливаемого сигнала в безопасном для лампы режиме; б) определить напряжение смещения E_c, постоянные составляющие анодного тока I_{a0}, анодного напряжения U_{a0} и напряжения на нагрузке U_{R0}; в) определить амплитуду входного напряжения U_{mc}, переменные составляющие анодного тока I_{ma} и напряжения на нагрузке U_{mR}; г) определить коэффициент усиления каскада K, ра-

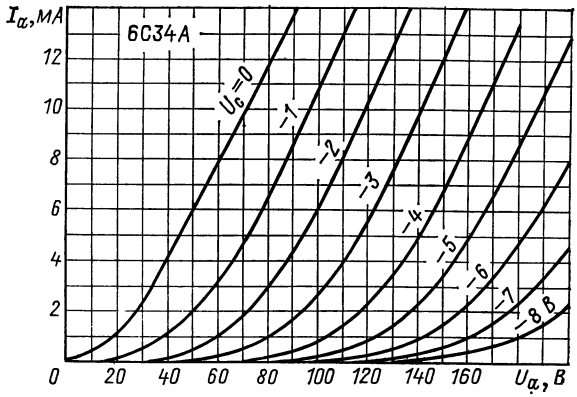


Рис. 4.11.

бочую крутизну S_p (предварительно построив рабочую анодно-сеточную характеристику) и входную рабочую емкость $C_{вх.раб}$, отыскав значения статических междуэлектродных емкостей в справочнике; д) определить полезную мощность $P_{вых}$, мощность P_a, рассеиваемую на аноде, полную потребляемую мощность P_0 и КПД анодной цепи η; е) на характеристиках слева от оси ординат построить кривую $I_a=f(t)$, снизу от оси абсцисс кривую $U_a=f(t)$ и над кривой $P_{amax}—U_c=f(t)$. Воспользоваться характеристиками, приведенными в справочнике.

4.66. Триод 6С34А, анодные характеристики которого изображены на рис. 4.11, работает в схеме на рис. 4.12. Нагрузкой является резистор сопротивлением $R_a=10$ кОм, шунтированный дросселем, обладающим бесконечно большой самоиндукцией $L_{др}=\infty$ и сопротивлением постоянному току $r_{др}=0$. Напряжение источника анодного питания $E_a=$ $=140$ В, амплитуда сигнала $U_{mc}=4$ В, напряжение смещения $E_c=-4$ В. Определить: а) постоянную составляющую анодного тока I_{a0}; б) амплитуду переменной составляющей

анодного тока I_{ma}; в) амплитуду переменной составляющей анодного напряжения U_{ma}; г) полезную мощность $P_{вых}$; мощность P_0, подводимую к лампе; мощность $P_а$, рассеиваемую анодом; д) модуль коэффициента усиления каскада и коэффициент полезного действия анодной цепи η.

4.67. Триод 6С1П включен в схему катодного повторителя (рис. 4.13). Напряжение источника анодного питания $E_а$=220 В. Сопротивление резистора нагрузки $R_к$=10 кОм.

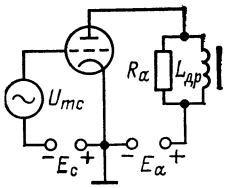


Рис. 4.12.

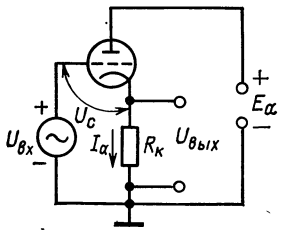


Рис. 4.13.

Определить: а) максимальное и минимальное значения входного напряжения и соответствующие им значения выходного напряжения при условии работы без сеточных токов; б) коэффициент усиления каскада; в) каковы будут пределы изменения входного напряжения при работе без сеточных токов, если резистор $R_к$ включить в анодную цепь.

Решение. На семейство анодных характеристик наносим линию нагрузки (рис. 4.14). Проектируя точку пересечения линии нагрузки с характеристикой, снятой при напряжении сетки $U_c=0$ (условие работы без сеточных токов), на ось ординат, определим максимальное значение анодного тока: I_{amax}=12 мА, следовательно, максимальное значение выходного напряжения $U_{выхmax}=I_{amax}R_к=12\times10^{-3}\cdot10\cdot10^3=120$ В, а так как в этом случае напряжение сетки $U_c=0$, то максимальное значение входного напряжения также равно 120 В.

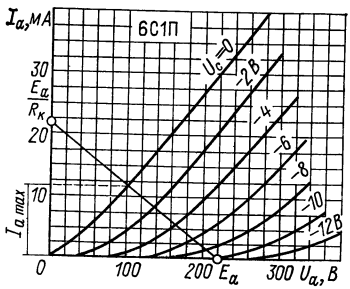


Рис. 4.14.

Из семейства характеристик (рис. 4.14) видим, что напряжение запирания $U_{с.зап}$ для лампы 6С1П при анодном

сетку подается синусоидальный сигнал с амплитудой U_{mc}= =500 мВ. Для случая, когда лампа заперта, определить переменное напряжение на резисторе нагрузки $R_а$=200 кОм на частоте 16 МГц.

5.58. Высокочастотный пентод с крутизной 2 мА/В работает в усилительном каскаде. Нагрузкой служит резонансный колебательный контур. Параметры контура: L= =200 мкГн; r=10 Ом, C=200 пФ. Определить резонансную частоту контура, его эквивалентное сопротивление и коэффициент усиления каскада на резонансной частоте.

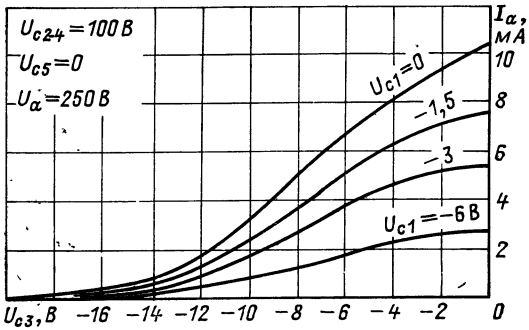


Рис. 5.13.

5.59. В усилителе напряжения используется пентод, у которого S=5 мА/В, $C_{c1к}$=4 пФ, индуктивность катодного ввода $L_к$=0,05 мкГн, частота f=100 МГц. Определить входную проводимость усилителя.

5.60. Как осуществляется двойное управление в пентоде? В каком режиме при этом должен работать пентод? Каковы недостатки пентода как лампы с двойным управлением?

5.61. Поясните возможность двойного управления электронным потоком в пентоде и покажите, что в этом случае появляется переменная составляющая анодного тока промежуточной частоты.

5.62. Гептод-преобразователь работает в следующем режиме: анодное напряжение $U_а$=250 В, напряжение второй и четвертой сеток U_{c2-4}=100 В, напряжение смещения на гетеродинной сетке U_{c1}=−3 В, на сигнальной U_{c3}=−1,5 В. Пользуясь семейством характеристик лампы $I_а=f(U_{c3})$, изображенных на рис. 5.13, построить зависимость $S_3=f(U_{c1})$, затем вычислить: а) коэффициент преобразования $K_{пр}$; б) крутизну преобразования $S_{пр}$; в) модуль коэффициента усиления каскада K; г) амплитуду переменной составляю-

щей анодного тока промежуточной частоты I_{ma} и амплитуду переменного напряжения U_{mR} на анодном контуре, имеющем эквивалентное сопротивление для тока промежуточной частоты 50 кОм, если на сигнальную сетку лампы подается переменное напряжение U_{mc3}=0,001 В, а на гетеродинную U_{mc1}=3 В.

5.63. Нарисовать схему частотно-преобразовательного каскада с лампой 6И1П. Пользуясь справочником, определить: а) крутизну преобразования гептода в следующем режиме: напряжение анода U_a=250 В, напряжение второй и четвертой сеток U_{c2-4}=100 В, напряжение первой сетки U_{c1}=—5 В, сопротивление в цепи сетки триода, соединенной с третьей сеткой гептода, 47 кОм; б) параметры триодной части триод-гептода в следующем режиме: анодное напряжение U_a=90 В и напряжение управляющей сетки U_c= =—2 В.

5.64. Найти коэффициент усиления по модулю частотно-преобразовательного каскада, если $S_{пр}$=0,6 мА/В, а контур промежуточной частоты в анодной цепи имеет следующие параметры: L=200 мкГн, C=200 пФ, r=50 Ом.

5.65. Перечислите возможные способы увеличения крутизны характеристики лампы и назовите разновидности ламп с повышенной крутизной характеристики. Каковы особенности устройства и режимов этих ламп?

5.66. Имеются ли какие-либо конструктивные особенности в приемно-усилительных лампах, работающих в импульсном режиме, и в чем особенности их характеристик и параметров?

5.67. Расшифруйте элементы обозначений маркировки следующих ламп: 6П1П, 6П13С, 6П9, 6Ж27Л, 6К11Б-К, 6Ж1Ж, 6К3, 6Э6П-К, 6Э12Н, 6В2П, ГУ-32, ГУ-80, 6И1П.

Глава шестая

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

6.1. Какова вероятность найти электрон на нижнем уровне зоны проводимости в собственном германии (ширина запрещенной зоны E_g=0,72 эВ), если температура образца равна: а) 30 К; б) 300 К; в) температуре точки плавления 937 °С?

6.2. Какова вероятность найти электрон на нижнем уровне зоны проводимости при комнатной температуре (T=300 К): а) в собственном германии (E_g=0,72 эВ); б) в собственном кремнии (E_g=1,12 эВ); в) в алмазе (E_g=5,6 эВ)? Что означают эти результаты?

напряжении $U_а$=220 В будет равно — 10 В. Следовательно, входной сигнал может изменяться от +120 до —10 В (при работе без сеточных токов). Соответствующее выходное напряжение изменяется от 120 В до 0, поэтому коэффициент усиления каскада $K=U_{mвых}/U_{mвх}=120/130=0{,}92$.

Заметим, что соответствующие пределы изменения входного сигнала для усилителя, собранного по схеме с общим катодом, при такой же нагрузке и при таком же напряжении анодного питания $E_а$ получаются более узкими, чем для катодного повторителя (только от 0 до —10 В).

4.68. Что называется входным сопротивлением электронной лампы и какими факторами оно определяется?

4.69. Триод работает в усилительном каскаде без отрицательного смещения сетки. Источник входного напряжения обеспечивает ЭДС, равную 5 В, и имеет внутреннее сопротивление 9 кОм. Считая входное сопротивление триода при положительном напряжении сетки 1 кОм, а при отрицательном 1 МОм, определить амплитуды положительной и отрицательной полуволн входного напряжения. Изобразить временну́ю диаграмму этого напряжения.

4.70. Рассчитать сопротивление резистора в цепи катода $R_к$ (для автоматического смещения), необходимое для получения на сетке напряжения смещения $E_с$=—4 В, и мощность, рассеиваемую на этом резисторе, если ток покоя $I_{а0}$=10 мА.

Решение. Сопротивление резистора $R_к$ определим по формуле

$$R_к=|E_с|/I_{а0}=4/(10\cdot10^{-3})=400 \text{ Ом}.$$

Мощность, рассеиваемая на резисторе $R_к$,

$$P_к=I^2_{а0}R_к=(10\cdot10^{-3})^2\cdot400=4\cdot10^{-2} \text{ Вт}.$$

4.71. Определить сопротивление резистора $R_к$ и емкость конденсатора $C_к$ в цепи автоматического смещения, если ток покоя $I_{а0}$=8 мА, напряжение смещения $E_с$=—4 В и диапазон усиливаемых частот f=50÷10^5 Гц.

Решение. Сопротивление $R_к$ определим по формуле

$$R_к=|E_с|/I_{а0}=4/8\cdot10^{-3}=500 \text{ Ом}.$$

Емкость выбираем из условия, чтобы ее сопротивление на низшей частоте сигнала было значительно меньше (в 10 раз) сопротивления $R_к$, т. е. $1/(\omega_н C_к)=1/(2\pi f_н C_к)=$ $=0{,}1R_к$, откуда $C_к=1/(6{,}28\cdot50\cdot0{,}1\cdot500)=64$ мкФ.

4.72. Триод 6С34А включен в схему, приведенную на рис. 4.15. Пользуясь анодными характеристиками триода, определить анодный ток $I_{а0}$, анодное напряжение $U_{а0}$ и на-

пряжение сетки E_c (координаты рабочей точки), если R_a=
=15,5 кОм, $R_к$=0,5 кОм и E_a=160 В.

Решение. Из рис. 4.15 согласно второму закону Кирхгофа следует, что $E_a=I_aR_a+U_a+I_aR_к$. Решив это уравнение относительно I_a, получим уравнение линии нагрузки: $I_a=(E_a-U_a)/(R_a+R_к)$. Полагая в этом уравнении $I_a=0$, получим первую точку линии нагрузки: $U_a=E_a=160$ В, а полагая $U_a=0$, вторую точку линии нагрузки:

$$I_a=E_a/(R_a+R_к)=160/[(15{,}5+0{,}5)\cdot10^{-3}]=10 \text{ мА}.$$

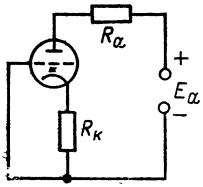


Рис. 4.15.

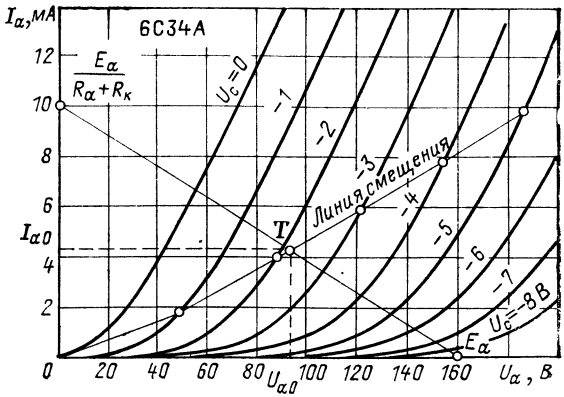


Рис. 4.16.

Нанесем линию нагрузки на семейство анодных характеристик (рис. 4.16). Из рис. 4.15 следует, что напряжение смещения $E_c=-I_{a0}R_к$. Это уравнение называется уравнением линии смещения. Чтобы найти координаты рабочей точки, нужно на семейство анодных характеристик нанести линию смещения. Задаваясь значениями напряжения E_c и подставляя их в последнее уравнение, получим значения тока I_a. Результаты вычислений приведены ниже:

E_c, В	0	−1	−2	−3	−4	−5
I_a, мА	0	2	4	6	8	10

Построенная по этим данным линия смещения показана на рис. 4.16. Точка пересечения линии нагрузки с линией смещения определит положение рабочей точки T. Проецируя рабочую точку на ось ординат, получаем значение анодного тока I_{a0}=4,2 мА, а на ось абсцисс — значение анодного напряжения U_{a0}=92 В. Напряжение сетки $E_c=-I_{a0}R_к=-4{,}2\cdot10^{-3}\cdot500=-2{,}1$ В. Это значение напряжения можно определить и из графика.

6.3. Ширина запрещенной зоны E_g собственного кремния равна 1,12 эВ. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах 0 и 300 К. Как изменится эта вероятность при указанных температурах, если на полупроводник будет действовать электромагнитное излучение с длинами волн $\lambda=0{,}6$ и 2,0 мкм? Считать, что при $T=300$ К $E-E_F$ практически равно $E_g/2$.

Решение. 1. Функция распределения Ферми — Дирака имеет вид:

$$P(E)=[1+e^{(E-E_F)/(kT)}]^{-1},$$

где $P(E)$ — вероятность того, что электрон имеет энергию E. При $T=0$ К $E>E_F$, $e^{(E-E_F)/(kT)}\to\infty$ и $P(E)=0$.

Следовательно, энергия электрона не превышает E_F.

Вероятность того, что при температуре $T=300$ К электрон обладает энергией E относительно дна зоны проводимости,

$$P(E)=[1+e^{0{,}56\cdot1{,}6\cdot10^{-19}/(1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300)}]^{-1}=(1+e^{21{,}6})^{-1}=4\cdot10^{-10}.$$

2. Когда на полупроводник действует излучение с длиной волны $\lambda=0{,}6$ мкм, частота этого излучения

$$\nu=c/\lambda=3\cdot10^8/(0{,}6\cdot10^{-6})=5\cdot10^{14}\ \text{Гц}.$$

Энергия

$$E=h\nu=6{,}62\cdot10^{-34}\cdot5\cdot10^{14}=3{,}31\cdot10^{-19}\ \text{Дж}=2{,}1\ \text{эВ}$$

(h — постоянная Планка).

Поскольку 2,1 эВ>1,12 эВ, то вероятность нахождения электронов в зоне проводимости увеличивается как при 0 К, так и при 300 К.

3. Если на полупроводник действует излучение с длиной волны $\lambda=2$ мкм, то

$$\nu=c/\lambda=3\cdot10^8/(2\cdot10^{-6})=1{,}5\cdot10^{14}\ \text{Гц};$$

$$E=h\nu=6{,}62\cdot10^{-34}\cdot1{,}5\cdot10^{14}/(1{,}6\cdot10^{-19})=0{,}62\ \text{эВ}.$$

Так как 0,62 эВ<1,12 эВ, то никакого изменения вероятности не происходит ни при $T=0$ К, ни при $T=300$ К.

6.4. Разрешенный радиус орбиты и энергетические уровни атома Бора определяются выражениями

$$r_n=\frac{\varepsilon_0h^2n^2}{\pi mZe^2};\quad E_n=\frac{-me^4Z^2}{8\varepsilon^2_0h^2n^2},$$

где Z — атомное число; e — заряд электрона; m — масса электрона; h — постоянная Планка; n — главное квантовое число орбиты; ε_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

Покажите, что эти выражения могут быть записаны следующим образом:

$$r_n = 0{,}529 \cdot 10^{-4} n^2/Z \text{ и } E_n = -13{,}6 Z^2/n^2,$$

причем r_n измеряется в микрометрах, а E_n — в электронвольтах.

Решение.

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m Z e^2} = \frac{8{,}86 \cdot 10^{-12} (6{,}62 \cdot 10^{-34})^2 n^2}{3{,}14 \cdot 9{,}106 \cdot 10^{-31} \cdot (1{,}602 \cdot 10^{-19})^2 Z} =$$

$$= 0{,}529 \cdot 10^4 n^2/Z \text{ мкм};$$

$$E_n = -\frac{m e^4 Z^2}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{9{,}106 \cdot 10^{-31} (1{,}602 \cdot 10^{-19})^4 Z^2}{8 (8{,}86 \cdot 10^{-12})^2 (6{,}62 \cdot 10^{-34})^2 n^2} =$$

$$= -\frac{21{,}8 \cdot 10^{-19} Z^2}{n^2} \text{ Дж} = -\frac{21{,}8 \cdot 10^{-19} Z^2}{n^2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = -13{,}6 Z^2/n^2, \text{ эВ}.$$

6.5. Движение пятого электрона на внешней орбите примесного атома V группы в полупроводнике IV группы можно приближенно рассматривать как круговое по орбите вокруг единичного положительного заряда ядра $+e$ и через вещество с диэлектрической проницаемостью основного материала.

Покажите, что электрону требуется энергия только около 0,1 эВ, чтобы освободиться и стать электроном проводимости в кристалле с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 12. Определите также радиус орбиты основного состояния и тем самым подтвердите предположение, что электрон движется в среде с диэлектрической проницаемостью основного материала. Постоянная решетки материала $5{,}42 \cdot 10^{-4}$ мкм.

Решение.

$$E_n = -13{,}6 Z^2/(\varepsilon^2 n^2) \text{ (см. задачу 6.4).}$$

Для $Z = 1$, $n = 1$, $\varepsilon = 12$

$$E_n = 13{,}6/(12{,}0)^2 = 0{,}094 \text{ эВ}.$$

Из задачи 6.4 следует

$$r = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m e^2 Z} =$$

$$= \frac{12{,}0 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12} (6{,}62 \cdot 10^{-34})^2}{\pi \cdot 9{,}10 \cdot 10^{-31} (1{,}602 \cdot 10^{-19})^2} \text{ м} = 6{,}35 \cdot 10^{-4} \text{ мкм},$$

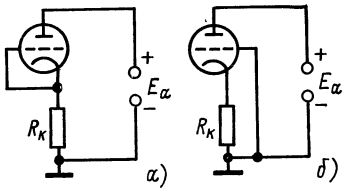


Рис. 4.17.

4.73. Пользуясь анодно-сеточными характеристиками триода 6С34А (см. рис. 4.4), определить координаты рабочей точки (I_{a0}, U_{a0}, E_c), если триод включен в схему на рис. 4.15. Данные схемы: E_a=140 В, R_a=9,5 кОм, $R_к$=0,5 кОм.

4.74. В цепь катода триода 6С34А включен резистор сопротивлением $R_к$=10 кОм. Напряжение источника анодного питания E_a=120 В. Определить анодный ток триода, если: а) сетка соединена с катодом (рис. 4.17,*а*); б) сетка подключена к отрицательному полюсу источника питания (рис. 4.17,*б*).

Аналитический расчет рабочего режима

4.75. В анодную цепь триода 6С35А включен резистор сопротивлением R_a=35 кОм. Пользуясь справочником, определить модуль коэффициента усиления каскада, если триод работает в типовом режиме.

4.76. Триод 6С7Б, предназначенный для усиления колебаний низкой частоты, имеет следующие параметры: статический коэффициент усиления μ=66, крутизна характеристики S=4 мА/В. Чему должно быть равно сопротивление резистора нагрузки, чтобы получить коэффициент усиления каскада по модулю $|K|$=45?

4.77. Коэффициент усиления каскада по модулю $|K|$=30, крутизна характеристики S=4 мА/В, сопротивление резистора нагрузки в анодной цепи R_a=20 кОм. Определить: а) статический коэффициент усиления триода μ; б) внутреннее сопротивление триода R_i.

4.78. Триод имеет в рабочей точке статический коэффициент усиления μ=100 и внутреннее сопротивление R_i=50 кОм. Определить: а) сопротивление нагрузки R_a, при котором получается 50-кратное усиление напряжения, б) рабочую крутизну $S_{раб}$.

4.79. Триод работает в режиме усиления. Сопротивление резистора нагрузки R_a=100 кОм, крутизна характеристики S=3 мА/В, крутизна рабочей характеристики $S_{раб}$=0,6 мА/В. Определить: а) статический коэффициент усиления триода μ; б) внутреннее сопротивление R_i; в) модуль коэффициента усиления каскада K.

4.80. Триод имеет коэффициент усиления по напряжению, равный 24 при сопротивлении нагрузки 12 кОм и 30

при сопротивлении нагрузки 30 кОм. Определить S, R_i и μ.

4.81. Пользуясь справочником, определить, при каких значениях сопротивления нагрузки коэффициент усиления каскада с триодом 6С6Б будет меньше единицы.

4.82. Триод, имеющий в рабочей точке внутреннее сопротивление R_i=10 кОм и статический коэффициент усиления μ=36, нагружен на чисто индуктивное сопротивление с индуктивностью 5 Гн. Определить: а) коэффициент усиления каскада на частоте 1600 Гц; б) крутизну в рабочей точке S; в) рабочую крутизну $S_{раб}$.

Решение. Сопротивление индуктивности на частоте 1600 Гц

$$X_а=2\pi fL=6{,}28\cdot 1600\cdot 5{,}0=50{,}0 \text{ кОм}.$$

Модуль коэффициента усиления каскада

$$|K|=\mu X_а/\sqrt{R^2_i+X^2_а}=36\cdot 50\cdot 10^3/\sqrt{(10\cdot 10^3)^2+(50\cdot 10^3)^2}=$$
$$=35{,}4.$$

Определим крутизну в рабочей точке

$$S=\mu/R_i=36/10^4=3{,}6 \text{ мА/В}.$$

Модуль рабочей крутизны определяется следующим образом:

$$|S_{раб}|=SR_i/\sqrt{R^2_i+X^2_а}=$$
$$=3{,}6\cdot 10^{-3}\cdot 10\cdot 10^{-3}/\sqrt{(10\cdot 10^3)^2+(50\cdot 10^3)^2}=0{,}707 \text{ мА/В}.$$

4.83. Рассчитать и построить зависимость параметров $S_{раб}$ и K триода 6С35А от сопротивления нагрузки.

4.84. Триод 6Н3П работает в режиме усиления. Сопротивление нагрузки $R_а$=24 кОм, крутизна S=6 мА/В, внутреннее сопротивление R_i=6 кОм, амплитуда усиливаемого напряжения U_{mc}=1,5 В. Требуется: изобразить схемы замещения с генераторами тока и напряжения и определить: а) амплитуду переменной составляющей анодного тока I_{ma}; б) амплитуду переменной составляющей напряжения на аноде U_{ma}; в) выходную мощность $P_{вых}$; г) коэффициент усиления каскада.

4.85. Два триода работают в режиме усиления. Триод 6Н15П имеет статический коэффициент усиления μ'=38, внутреннее сопротивление R'_i=6,8 кОм, триод 6Н17Б имеет статический коэффициент усиления μ''=75, крутизну S''=3,8 мА/В. В анодные цепи включены резисторы, сопротивления которых равны внутренним сопротивлениям соответствующих ламп. К сеткам обеих ламп подводится одинаковое переменное напряжение амплитудой U_{mc}=0,5 В.

т. е. наименьшая орбита проходит за пределами ближайшего соседнего атома, т. е. в среде основного материала.

6.6. На какие свойства полупроводника влияет ширина запрещенной зоны?

6.7. Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны при комнатной температуре (T=300 К), если эффективная масса электрона в 2 раза больше эффективной массы дырки.

6.8. В собственном полупроводнике концентрация электронов проводимости при температуре T=300 К равна $1{,}5\cdot10^{16}$ м$^{-3}$. Найти ширину запрещенной зоны и положение уровня Ферми для этого полупроводника, если постоянная $G=4{,}83\cdot10^{21}$ м$^{-3}\cdot$К$^{-3/2}$.

6.9. Уровень Ферми полупроводника находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на расстоянии $3kT$ выше дна зоны проводимости, заняты электронами? Какова вероятность того, что уровень у потолка валентной зоны содержит дырки, если ширина запрещенной зоны 1,1 эВ?

6.10. Определить положение уровня Ферми в германии n-типа при температуре T=300 К, если на $2\cdot10^6$ атомов германия приходится один атом примеси. Концентрация атомов в германии равна $4{,}4\cdot10^{28}$ атомов/м^3. Постоянная G в выражении, связывающем число электронов в единице объема в зоне проводимости с температурой и энергетическими уровнями, равна $4{,}83\cdot10^{21}$ м$^{-3}\cdot$К$^{-3/2}$. Ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а расстояние между дном зоны проводимости и донорным уровнем 0,01 эВ.

Решение. Поскольку концентрация атомов в германии равна $4{,}4\cdot10^{28}$ м$^{-3}$ и на $2\cdot10^6$ атомов германия приходится один атом примеси, то число свободных электронов в нем составит $2{,}2\cdot10^{22}$ м$^{-3}$. Концентрация свободных электронов в германии определяется следующим образом:

$$n_n = GT^{3/2}e^{-(E_c-E_F)/(kT)} = N_c e^{-(E_c-E_F)/(kT)}, \qquad (1)$$

где $G=4{,}83\cdot10^{21}$ м$^{-3}\cdot$К$^{-3/2}$; N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, определяемая выражением

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} = 2\,\frac{(2\pi m_n^* k)^{3/2}T^{3/2}}{h^3}.$$

Согласно условию задачи $n_n=2{,}2\cdot10^{22}$ м$^{-3}$. Поскольку разница между донорным уровнем и дном зоны проводимости равна 0,01 эВ, а ширина запрещенной зоны E_g= =0,72 эВ, то можно считать, что при комнатной температу-

ре все атомы примеси ионизированы, и пренебречь тепловой генерацией носителей.

При $T=300$ К

$$N_c=GT^{3/2}=4{,}83\cdot10^{21}\cdot300^{3/2}=25\cdot10^{24}\ \text{м}^{-3}.$$

Перепишем выражение (1) в виде

$$e^{(E_c-E_F)/kT}=N_c/n_n$$

или

$$(E_c-E_F)/(kT)=\ln(N_c/n_n),$$

отсюда

$$E_c-E_F=kT\ln(N_c/n_n),$$

причем E_c-E_F измеряется в джоулях.

Таким образом,

$$E_c-E_F=300\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\ln\left(\frac{25\cdot10^{24}}{2{,}2\cdot10^{22}}\right)\frac{1}{1{,}6\cdot10^{-19}}=0{,}18\ \text{эВ}.$$

Следовательно, уровень Ферми находится на 0,18 эВ ниже дна зоны проводимости.

6.11. Найти положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны при температуре $T=300$ К для кристалла германия, содержащего $5\cdot10^{16}$ атомов мышьяка в 1 см^3.

6.12. Вычислить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при температуре $T=400$ К для кристалла германия, содержащего $5\cdot10^{16}$ атомов сурьмы в 1 см^3.

6.13. Кристалл кремния содержит 10^{17} атомов бора в 1 см^3. Найти положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны при температуре $T=300$ К.

6.14. Вычислить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при температуре $T=300$ К для кристалла германия, содержащего 10^{17} атомов сурьмы и $5\cdot10^{16}$ атомов индия в 1 см^3.

6.15. Решить задачу 6.14 при условии, что температура $T=150$ К.

6.16. Определить относительное положение уровня Ферми в кремниевом полупроводнике p-типа и концентрацию неосновных носителей заряда, если концентрация акцепторной примеси $N_a=10^{16}$ см$^{-3}$, а температура окружающей среды $T=343$ К.

6.17. В кристалле германия n-типа на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом донорной примеси. Полагая, что эффективная масса электрона m^*_n равна $^1/_2$ массы покоя электрона, найти положение уровня Ферми от-

Определить: а) амплитуды переменного напряжения на нагрузках и полезные мощности, рассеиваемые на нагрузках каждой из ламп; б) при каком значении сопротивления нагрузки эти лампы будут давать одинаковое усиление напряжения?

4.86. Триод 6Н4П используется в схеме катодного повторителя, изображенной на рис. 4.13, и работает в типовом режиме. Напряжение анода U_{a0}=250 В, напряжение смещения E_c=—4 В, ток покоя анода I_{a0}=3 мА, крутизна

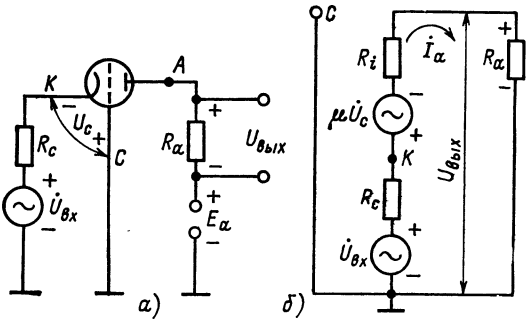


Рис. 4.18.

характеристики S=1,75 мА/В, статический коэффициент усиления μ=41. Определить: а) сопротивление резистора в цепи катода; б) напряжение источника анодного питания; в) коэффициент усиления по напряжению; г) переменную составляющую падения напряжения на $R_к$ при входном сигнале с амплитудой $U_{mвх}$=4 В; д) переменную составляющую напряжения, действующего между сеткой и катодом лампы.

4.87. Триод 6С29Б работает в схеме усилителя с общей сеткой (рис. 4.18,*а*) в типовом режиме. Сопротивление резистора нагрузки $R_а$=25 кОм, амплитуда входного сигнала $U_{mвх}$=5 В, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_с$=200 Ом. Пользуясь справочником, аналитически определить: а) анодный ток; б) амплитуду выходного напряжения; в) коэффициент усиления каскада; г) входное сопротивление $R_{вх}$.

Решение. Схему усилителя с общей сеткой, изображенную на рис. 4.18,*а*, заменим схемой замещения, показанной на рис. 4.18,*б*.

Используя второй закон Кирхгофа, для схемы замещения можно записать: $\dot{U}_{вх}-\mu\dot{U}_с-\dot{I}_а(R_i+R_с+R_а)=0$, а для

схемы на рис. 4.18,*а* $\dot{U}_c = -(\dot{U}_{вх} - \dot{I}_a R_c)$. Подставив последнее уравнение в предыдущее, получим:

$$\dot{U}_{вх} + \mu(\dot{U}_{вх} - \dot{I}_a R_c) - \dot{I}_a(R_i + R_c + R_a) = 0.$$

Отсюда следует, что

$$I_{ma} = \frac{U_{m\,вх}(\mu+1)}{R_i + (\mu+1)R_c + R_a} = \frac{5(40+1)}{[2{,}1\cdot10^3 + (40+1)\cdot200 + 25\cdot10^3]} = 5{,}8\ мА;$$

амплитуда выходного напряжения

$$U_{m\,вых} = I_{ma}R_a = \frac{(\mu+1)U_{m\,вх}R_a}{(\mu+1)R_c + R_i + R_a} =$$

$$= \frac{(40+1)\cdot5\cdot25\cdot10^3}{(40+1)\cdot200 + 2{,}1\cdot10^3 + 25\cdot10^3} = 145\ В;$$

коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{-R_a}{R_c + (R_i + R_a)/(\mu+1)} =$$

$$= \frac{25\cdot10^3}{200 + (2{,}1\cdot10^3 + 25\cdot10^3)/(40+1)} = -29;$$

входное сопротивление

$$R_{вх} = \dot{U}_{вх}/\dot{I}_a = (R_i + R_a)/(\mu+1) + R_c =$$

$$= (2{,}1\cdot10^3 + 25\cdot10^3)/(40+1) + 200 = 860\ Ом.$$

4.88. Триод имеет следующие параметры: $R_i = 6$ кОм; $S = 5$ мА/В. Полагая, что характеристики триода аппроксимированы прямыми линиями, постройте семейство анодных характеристик для напряжений сетки 0, —2, —4, —6 и —8 В при изменении анодного напряжения от 0 до 400 В. Этот триод включен в усилительный каскад, напряжение источника питания $E_a = 320$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_a = 15$ кОм. Определить координаты рабочей точки для двух случаев: а) напряжение смещения подается от отдельного источника в сеточной цепи с $E_c = -5{,}5$ В; б) напряжение смещения обеспечивает резистор $R_к = 200$ Ом, включенный в цепь катода.

4.89. Триод имеет следующие параметры: $R_i = 5$ кОм; $S = 4$ мА/В. Полагая, что характеристики триода аппроксимированы прямыми линиями, постройте семейство анодных характеристик для напряжений сетки 0, —3, —6, —9 и —12 В при изменении анодного напряжения от 0 до 300 В. Триод включен в усилительный каскад, у которого сопротивление резистора нагрузки $R_a = 7{,}5$ кОм, напряжение

носительно дна зоны проводимости при комнатной температуре (300 К).

6.18. Решить задачу 6.17 при условии, что в кристалле германия на каждые 10^3 атомов германия приходится один атом донорной примеси (а); при какой концентрации донорной примеси уровень Ферми совпадает с дном зоны проводимости (б)?

6.19. В кристалле кремния p-типа на каждые 10^8 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси. Найти положение уровня Ферми при комнатной температуре (T=300 К) относительно валентной зоны.

6.20. Решить задачу 6.19 при условии, что на каждые 10^3 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси (а); при какой концентрации акцепторной примеси уровень Ферми совпадает с потолком валентной зоны (б)?

6.21. Имеется кристалл германия p-типа при комнатной температуре (T=300 К). При какой концентрации акцепторной примеси уровень Ферми будет совпадать с потолком валентной зоны, если $m^*_p=0{,}4\ m_0$?

6.22. Удельное сопротивление собственного германия при T=300 К ρ=0,43 Ом·м. Подвижности электронов и дырок в германии равны соответственно 0,39 и 0,19 м²/(В·с). Определите собственную концентрацию электронов и дырок.

Решение. Удельная проводимость полупроводника σ определяется из уравнения

$$\sigma=e(p\mu_p+n\mu_n),$$

где n — концентрация электронов; p—концентрация дырок; μ_n—подвижность электронов; μ_p—подвижность дырок; e—заряд электрона.

Для собственного полупроводника $p=n=n_i$, где n_i — концентрация электронов и дырок. Поэтому собственная удельная проводимость σ_i задается в виде

$$\sigma_i=1/\rho_i=n_ie(\mu_n+\mu_p),$$

отсюда

$$n_i=\frac{1}{0{,}43\cdot 1{,}602\cdot 10^{-19}(0{,}39+0{,}19)}=2{,}5\cdot 10^{19}\ \text{м}^{-3}.$$

6.23. Образец германия, рассмотренный в задаче 6.22, легирован примесью атомов сурьмы так, что один атом примеси приходится на $2\cdot 10^6$ атомов германия. Определить: а) концентрацию электронов и дырок при T=300 К (предположить, что при этой температуре все атомы сурьмы ионизированны и концентрация атомов германия $N=4{,}4\times 10^{28}$ м$^{-3}$); б) удельное сопротивление этого легированно-

го материала, коэффициенты диффузии электронов и дырок в германии при данной температуре.

Решение. а) Концентрация донорных примесей

$$N_д = 4{,}4 \cdot 10^{28}/(2 \cdot 10^6) = 2{,}2 \cdot 10^{22}\ м^{-3}.$$

Собственная концентрация $n_i = 2{,}5 \cdot 10^{19}\ м^{-3}$.

Следовательно, концентрация дырок

$$p \approx n_i^2/N_д = (2{,}5 \cdot 10^{19})^2/(2{,}2 \cdot 10^{22}) = 2{,}84 \cdot 10^{16}\ м^{-3}.$$

б) Удельное сопротивление легированного полупроводника n-типа

$$\rho_n \approx \frac{1}{Ne_д\mu_n} = \frac{1}{2{,}2 \cdot 10^{22} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}39} = 7{,}3 \cdot 10^{-4}\ Ом \cdot м.$$

в) Определим коэффициенты диффузии электронов и дырок в германии при $T = 300$ К.

Соотношение Эйнштейна между подвижностью μ и коэффициентом диффузии D имеет вид: $D = kT\mu/e$, где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Для электронов

$$D_n = kT\mu_n/e = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0{,}39/(1{,}602 \cdot 10^{-19}) = 10{,}0 \cdot 10^{-3}\ м^2/с.$$

Для дырок

$$D_p = kT\mu_p/e = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0{,}19/(1{,}602 \cdot 10^{-19}) = 4{,}9 \cdot 10^{-3}\ м^2/с.$$

6.24. Определить концентрацию электронов и дырок при $T = 300$ К: а) в собственном кремниевом полупроводнике; б) в кристалле кремния, содержащем $5 \cdot 10^{17}$ атомов сурьмы в 1 см^3.

6.25. Определить концентрацию электронов и дырок в образце германия, который имеет концентрацию донорных атомов $N_д = 2 \cdot 10^{14}\ см^{-3}$ и концентрацию акцепторных атомов $N_а = 3 \cdot 10^{14}\ см^{-3}$ при $T = 300$ К.

6.26. Определить: а) удельное сопротивление собственного германия при $T = 300$ К; б) чему будет равно удельное сопротивление, если к этому образцу добавить донорную примесь так, чтобы один атом донорной примеси приходился на каждые 10^8 атомов германия?

6.27. Определить: а) удельное сопротивление собственного кремния при $T = 300$ К; б) каково будет удельное сопротивление этого кремния, если к образцу добавить донорную примесь так, чтобы один атом донорной примеси приходился на каждые 10^8 атомов кремния?

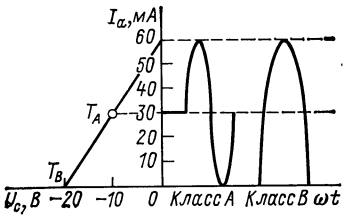


Рис. 4.19.

источника питания анодной цепи $E_а=300$ В, напряжение смещения $E_с=-6$ В, амплитуда сигнала $U_{mc}=6$ В. Определить: а) амплитуду переменной составляющей анодного тока; б) коэффициент усиления каскада K.

2.90. Рабочая анодно-сеточная характеристика триода при напряжении источника анодного питания $E_а=300$ В и сопротивлении нагрузки $R_а=4$ кОм аппроксимирована прямой линией, изображенной на рис. 4.19. Пользуясь этой характеристикой, сравнить усиление в режимах классов А и В, если известно, что: 1) в режиме класса А напряжение смещения $E_с=-10$ В и амплитуда сигнала $U_{mc}=10$ В; 2) в режиме класса В напряжение смещения $E_с=-20$ В и амплитуда сигнала $U_{mc}=20$ В.

Для обоих режимов найти: а) амплитуду первой гармоники анодного тока I_{ma}; б) постоянную составляющую анодного тока I_{a0}; в) выходную мощность $P_{вых}$; г) полную мощность P_0, рассеиваемую в анодной цепи; д) КПД анодной цепи.

Решение. 1. Для режима класса А из рис. 4.19 определяем:

$$I_{a0}=30 \text{ мА}; \; I_{ma}=30 \text{ мА}.$$

Выходную мощность рассчитываем по формуле

$$P_{вых}=0{,}5I^2_{ma}R_а=0{,}5(30\cdot10^{-3})^2\cdot4\cdot10^3=1{,}8 \text{ Вт}.$$

Полная мощность, рассеиваемая в анодной цепи,

$$P_0=I_{a0}E_а=30\cdot10^{-3}\cdot300=9 \text{ Вт}.$$

Коэффициент полезного действия анодной цепи в процентах

$$\eta=(P_{вых}/P_0)\cdot100=(1{,}8/9)\cdot100=20\%.$$

2. Для режима класса В из рис. 4.19 определяем

$$I_{a0}\approx I_{amax}/\pi=60\cdot10^{-3}/\pi=19{,}1 \text{ мА}.$$

Амплитуда первой гармоники анодного тока

$$I_{ma}=0{,}5I_{amax}=60\cdot10^{-3}/2=30 \text{ мА}.$$

Выходная мощность

$$P_{вых}=0{,}5I^2_{ma}R_а=0{,}5(30\cdot10^{-3})^2\cdot4\cdot10^3=1{,}8 \text{ Вт}.$$

Полная мощность, затрачиваемая в анодной цепи,

$$P_0=I_{a0}E_а=19{,}1\cdot10^{-3}\cdot300=5{,}73 \text{ Вт}.$$

Коэффициент полезного действия анодной цепи в процентах

$$\eta=(P_{\text{вых}}/P_0)\cdot 100=(1{,}8/5{,}73)\cdot 100=31{,}5\%.$$

4.91. Рабочая анодно-сеточная характеристика триода задана выражением $I_a=a_0+a_1U_c+a_2U^2_c$. Покажите, что малое входное напряжение, изменяющееся по закону $U_c=U\sin\omega t$, будет вызывать на выходе ток

$$I_a=a_0+a^2U^2/2+a_1U\sin\omega t-(a_2U^2/2)\cos 2\omega t.$$

4.92. Докажите, что в триоде при условии использования лампы на участке характеристики, который можно считать линейным, между мгновенными значениями анодного тока I_a, анодного напряжения U_a и напряжения сетки U_c существует следующая зависимость:

$$I_a=(U_a+\mu U_c+\text{const})/R_i,$$

где R_i — внутреннее сопротивление лампы; μ — статический коэффициент усиления лампы.

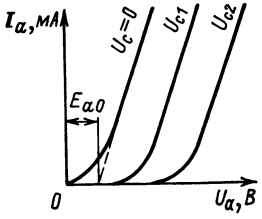


Рис. 4.20.

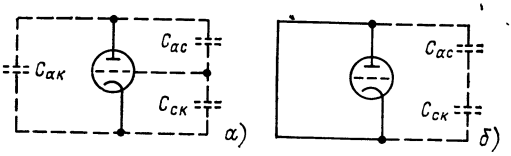


Рис. 4.21.

Укажите способ определения постоянной (const), входящей в уравнение, по статическим характеристикам ламп. Рассмотрите случаи, когда заданы анодно-сеточные и анодные характеристики. Определите постоянную для лампы, характеристики которой приведены на рис. 4.3.

4.93. Докажите, что постоянная составляющая анодного тока при использовании лампы на линейном участке характеристики может быть определена по формуле

$$I_{a0}=(E_a-E_{a0}+\mu E_c)/(R_i+R_a),$$

где E_a — напряжение источника анодного питания; E_c — напряжение смещения; R_a — сопротивление нагрузки; E_{a0} — отрезок, определяемый по статической характеристике лампы способом, указанным на рис. 4.20. Решите, пользуясь выведенной формулой, числовой пример. Пусть в схеме усилительного каскада работает лампа типа 6С1П с характеристиками, изображенными на рис. 4.3, в следующем

6.28. Образец германия содержит в качестве примеси фосфор с концентрацией $2 \cdot 10^{14}$ атомов в 1 см^3. Определить: а) каковы удельное сопротивление и тип полупроводника при комнатной температуре; б) какую нужно создать концентрацию атомов галлия в этом полупроводнике, чтобы тип полупроводника изменился на противоположный, а удельное сопротивление стало равным 0,6 Ом·см; в) какой процент содержания примеси в этом образце?

6.29. Определить удельное сопротивление кремния n-типа при $T=300$ К, если концентрация доноров $N_д$ равна 10^{14} см$^{-3}$ и 10^{18} см$^{-3}$.

6.30. Решить задачу 6.29 для германия при таких же концентрациях донорной примеси.

6.31. Решить задачу 6.29 для кремния при таких же концентрациях акцепторной примеси.

6.32. Образец германия легирован алюминием с концентрацией $N_а=2 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Определить удельную проводимость этого образца при $T=300$ К.

6.33. Образец собственного кремния имеет удельное сопротивление 2000 Ом·м при комнатной температуре и концентрацию электронов проводимости $n_i=1{,}4 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$. Определить удельное сопротивление образца, легированного акцепторной примесью с концентрацией 10^{21} и 10^{23} м$^{-3}$. Предположите, что подвижность дырок остается одинаковой как для собственного, так и для примесного кремния и равной $\mu_p=0{,}25\ \mu_n$.

6.34. В собственном германии при $T=300$ К имеется $4{,}4 \cdot 10^{28}$ атомов/м^3 и $2{,}5 \cdot 10^{19}$ электронов проводимости/м^3. Чему равна концентрация дырок и электронов проводимости в примесном германии, содержащем 1 атом донорных примесей на 10^9 основных атомов и такую же концентрацию акцепторных примесей?

6.35. Удельная проводимость образца собственного кремния при $T=300$ К равна $4{,}3 \cdot 10^{-4}$ См/м. Какова концентрация собственных носителей? Если через образец проходит ток, то какая часть этого тока обусловлена электронами?

6.36. Образец, рассмотренный в задаче 6.35, легирован донорными примесями и имеет электронную электропроводность. Концентрация доноров равна 10^{21} м$^{-3}$. Найти концентрацию дырок в легированном образце, а также определить, какая часть тока в этих условиях переносится дырками. Предполагается, что легирование практически не сказывается на подвижности носителей. При $T=300$ К подвижность электронов в кремнии принять $\mu_n=0{,}135$ м^2/(В·с); подвижность дырок $\mu_p=0{,}048$ м^2/(В·с).

6.37. Дан образец легированного кремния n-типа длиной 10 мм, шириной 2 мм и толщиной 1 мм. Подвижности электронов и дырок равны соответственно 0,12 и 0,05 м²/(В·с), концентрация собственных носителей заряда $n_i=1{,}5\cdot10^{16}$ м$^{-3}$. Определить: а) концентрацию примеси в образце, если сопротивление образца $R=150$ Ом; б) отношение дырочной удельной проводимости к электронной.

Решение. а) Определим удельное сопротивление материала

$$\rho=R\Pi/l=150\cdot1\cdot10^{-3}\cdot2\cdot10^{-3}/(10\cdot10^{-3})=0{,}03 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Удельное сопротивление примесного кремния n-типа определяется выражением

$$\rho=[e(n_n\mu_n+p_n\mu_p)]^{-1}. \qquad (1)$$

Подставив в (1) числовые данные из условия задачи, получим:

$$0{,}03=[1{,}6\cdot10^{-19}(n_n\cdot0{,}12+p_n\cdot0{,}05)]^{-1} \qquad (2)$$

или

$$0{,}12n_n+0{,}05p_n=2{,}08\cdot10^{20}. \qquad (3)$$

Поскольку $n_np_n=n^2_i$, то

$$p_n=n^2_i/n_n=(1{,}5\cdot10^{16})^2/n_n. \qquad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим:

$$0{,}12n_n+0{,}05(1{,}5\cdot10^{16})^2/n_n=2{,}08\cdot10^{20}$$

или

$$0{,}12n^2_n+0{,}05(1{,}5\cdot10^{16})^2-2{,}08\cdot10^{20}\ n_n=0.$$

Отсюда для n-полупроводника

$$n_n=\frac{2{,}08\cdot10^{20}+\sqrt{(2{,}08\cdot10^{20})^2-(4\cdot0{,}12\cdot0{,}05(1{,}5\cdot10^{16})^2}}{2\cdot0{,}12}=$$

$$=1{,}73\cdot10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Такое же значение имеет и концентрация доноров $N_д$.

б) Определим отношение дырочной удельной проводимости к электронной.

Дырочная и электронная удельные проводимости определяются выражениями:

$$\sigma_p=p_ne\mu_p;\quad \sigma_n=n_ne\mu_n.$$

Тогда

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n}=\frac{p_ne\mu_p}{n_ne\mu_n}=\frac{p_n\mu_p}{n_n\mu_n}=\frac{(1{,}5\cdot10^{16})^2\mu_p}{n^2_n\mu_n}.$$

режиме: $E_а=240$ В, $E_с=-2$ В, $R_а=10$ кОм; $E_а=240$ В, $E_с=-1$ В, $R_а=10$ кОм. Определить постоянную составляющую анодного тока $I_{а0}$, постоянную составляющую анодного напряжения $U_{а0}$, мощность рассеяния на аноде $P_{а0}$.

4.94. Триод 6С1П включен в усилительный каскад. Напряжение источника анодного питания $E_а=300$ В, сопротивление нагрузки $R_а=10$ кОм. Используя линейную аппроксимацию рабочей анодно-сеточной характеристики, определить угол отсечки θ анодного тока, максимальное значение I_{amax} и амплитуду I_{ma} первой гармоники анодного тока, если напряжение смещения $E_с=-16$ В и амплитуда сигнала $U_{mc}=16$ В.

4.95. С помощью прибора для измерения емкости определить простейшим образом междуэлектродные емкости триода $C_{ак}$, $C_{ас}$, $C_{ск}$ (рис. 4.21,*а*).

Решение. Закоротив анод и катод, измеряем емкость C_1, включив прибор между сеткой и анодом (рис. 4.21,*б*). Нетрудно заметить, что при этом $C_{ас}$ и $C_{ск}$ оказываются включенными параллельно, поэтому $C_1=C_{ас}+C_{ск}$. Аналогично, закоротив сетку и катод, найдем $C_2=C_{ас}+C_{ак}$ и, наконец, закоротив анод и сетку, найдем $C_3=C_{ак}+C_{ск}$.

Решая эти уравнения совместно, найдем:

$$C_{ак}=(C_2+C_3-C_1)/2;$$

$$C_{ас}=(C_1+C_2-C_3)/2;$$

$$C_{ск}=(C_1+C_3-C_2)/2.$$

4.96. Изобразите схему замещения усилительного каскада с триодом для низких и высоких частот. Как связаны междуэлектродные емкости триода с его входными, выходными и проходными емкостями и какое влияние оказывают последние на работу усилителя?

4.97. Определить входную рабочую емкость триода, работающего в режиме усиления, если сопротивление анодной нагрузки $R_а=40$ кОм. Триод имеет следующие параметры: статический коэффициент усиления $\mu=50$, внутреннее сопротивление $R_i=40$ кОм, входная емкость $C_{ск}=2{,}5$ пФ, проходная емкость $C_{ас}=2$ пФ.

4.98. В каких пределах может изменяться рабочая входная емкость усилительного каскада, если коэффициент нагрузки $\alpha=R_а/R_i$ изменяется от 0 до 1?

4.99. Триод работает в усилительном каскаде при $U_с=-3$ В. Входная емкость триода в рабочем режиме равна 160 пФ. Источник колебаний имеет амплитуду ЭДС 2 В

и внутреннее сопротивление 1 кОм. Найти амплитуду входного напряжения на частотах 1 кГц и 10 МГц.

4.100. Триод 6Н3П работает в усилительном каскаде без сеточных токов. Зная параметры и междуэлектродные емкости лампы (воспользоваться справочником) и считая сопротивление анодной нагрузки $R_а$=25 кОм, определить на частоте f=50 МГц при амплитуде сигнала U_{mc}=1 В: а) Y-параметры электронной лампы; б) переменную составляющую анодного тока $I_а$; в) коэффициент усиления каскада по напряжению.

4.101. Триод имеет следующие параметры: μ=26, R_i=10 кОм, $C_{ск}$=4 пФ, $C_{ас}$=3 пФ, в анодную цепь триода включена нагрузка вида (30+j40) кОм. Определить: а) входное сопротивление лампы; б) рабочую входную емкость на частоте $\omega=10^5$ рад/с.

4.102. Пользуясь справочником, найти значение проходной емкости $C_{ас}$ триода 6С35А и определить сопротивления этой емкости для токов на частотах f, равных 50 Гц и 50 МГц.

4.103. Определить предельную частоту, до которой может быть использован триод 6С3П как усилитель при заданном модуле коэффициента усиления $|K|$=25, если крутизна характеристики триода S=20 мА/В, проходная емкость $C_{ас}$=3 пФ.

4.104. Определить предельную частоту, при которой триод 6С34А может быть использован как усилитель, если крутизна характеристики триода S=4,6 мА/В, проходная емкость $C_{ас}$=1,6 пФ, а модуль коэффициента усиления каскада $|K|$=15.

4.105. Определить предельный коэффициент усиления триода 6Н1П на частоте 0,25 МГц, если крутизна характеристики триода S=3,5 мА/В и проходная емкость $C_{ас}$= =1,9 пФ.

Глава пятая

МНОГОСЕТОЧНЫЕ ЛАМПЫ

СТАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

5.1. Почему введение экранирующей сетки позволяет уменьшить проходную емкость лампы? Каким образом нужно включить тетрод, чтобы вторая сетка играла роль экранирующей?

5.2. Напишите формулы для действующего напряжения и напряжения запирания по первой сетке тетрода и пен-

Следовательно,

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n}=\frac{2,25\cdot10^{32}\cdot0,05}{(1,73\cdot10^{21})^2\cdot0,12}=3,1\cdot10^{-11}.$$

6.38. В собственном германии концентрация атомов равна $4,5\cdot10^{28}$ м$^{-3}$. При T=300 К один из каждых $2\cdot10^9$ атомов ионизирован. Подвижности электронов и дырок при этой температуре равны соответственно 0,39 и 0,19 м^2/(В·с). Определить: а) удельную проводимость собственного германия; б) удельную проводимость германия при T=300 К, легированного элементом V группы, если на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом примеси.

Решение. а) Найдем концентрацию собственных носителей заряда n_i в германии при T=300 К:

$$n_i=4,5\cdot10^{28}/(2\cdot10^9)=2,25\cdot10^{19}\ \text{м}^{-3}.$$

Удельная проводимость собственного германия

$$\sigma_i=n_ie(\mu_n+\mu_p)=2,25\cdot10^{19}\cdot1,6\cdot10^{-19}(0,39+0,19)=2,09\ \text{См/м}.$$

б) Собственный полупроводник, легированный элементом V группы, является материалом n-типа.

Определим концентрацию доноров $N_д$:

$$N_д=4,5\cdot10^{28}/10^8=4,5\cdot10^{20}\ \text{м}^{-3}.$$

Вычислим удельную проводимость полупроводника n-типа:

$$\sigma_n\approx e(N_д\mu_n+n^2{}_i\mu_p/N_д)\approx$$

$$\approx1,6\cdot10^{-19}\frac{4,5^2\cdot10^{40}\cdot0,39+2,25^2\cdot10^{38}\cdot0,19}{4,5\cdot10^{20}}\approx$$

$$\approx1,6\cdot10^{-19}\cdot1,76\cdot10^{20}=28\ \text{См/м}.$$

6.39. Образец собственного кремния при T=300 К имеет удельное сопротивление $2\cdot10^5$ Ом·см, концентрация электронов проводимости составляет $1,5\cdot10^{10}$ см$^{-3}$. Чему равно при этой температуре удельное сопротивление кремния n-типа с концентрацией доноров 10^{16} атомов/см^3? Предположите, что подвижность электронов в 3 раза больше подвижности дырок, и это соотношение сохраняется как для собственного, так и для примесного полупроводника. Дайте качественное обоснование основным сделанным допущениям и объясните, каким образом они могут быть подтверждены.

6.40. Определить концентрацию неосновных носителей заряда, их подвижность в образце германиевого полупроводника p-типа при T=300 К, если концентрация акцепторной примеси $N_а=10^{16}$ см$^{-3}$, а коэффициент диффузии электронов D_n=93 см^2/с.

6.41. Полупроводник в условиях равновесия имеет концентрацию дырок $p=10^{20}$ м$^{-3}$ и концентрацию электронов $n=2\cdot10^{19}$ м$^{-3}$. Определить: а) полную концентрацию примесей; б) тип доминирующей примеси; в) собственную концентрацию носителей заряда.

Решение. В условиях равновесия существует компенсация зарядов: $n+N_а=p+N_д$, где $N_а$ и $N_д$ — соответственно концентрации акцепторов и доноров, и предполагается, что все примеси ионизированы.

а) Полная концентрация примесей

$$N=N_а-N_д=p-n=10^{20}-2\cdot10^{19}=8\cdot10^{19}\ \text{м}^{-3}.$$

б) Значение $N_а-N_д$ положительно, следовательно, акцепторы присутствуют в большинстве и компенсированный материал p-типа.

в) Определим собственную концентрацию n_i:

$$n^2_i=np=10^{20}\cdot2\cdot10^{19},\ \text{откуда}\ n_i=4{,}5\cdot10^{19}\ \text{м}^{-3}.$$

6.42. Определить удельную проводимость образца кремния при $T=300$ К, если концентрация акцепторов в полупроводнике $N_а=2{,}3\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ и концентрация доноров $N_д=2{,}2\cdot10^{13}$ см$^{-3}$.

6.43. Покажите, что полупроводник имеет минимальную удельную проводимость при данной температуре, когда концентрация электронов $n=n_i\sqrt{\mu_p/\mu_n}$, где n_i — собственная концентрация, а μ_p и μ_n — соответственно подвижности дырок и электронов. Чему равна концентрация дырок p в этих условиях?

Найти собственную и минимальную удельные проводимости для германия, если $n_i=2{,}5\cdot10^{19}$ м$^{-3}$, $\mu_p=0{,}19$ м^2/(В·с) и $\mu_n=0{,}39$ м^2/(В·с). При каких значениях n и p (кроме $n=p=n_i$) этот кристалл имеет удельную проводимость, равную собственной?

Решение. Удельная проводимость

$$\sigma=ne\mu_n+pe\mu_p\ \text{и}\ np=n^2_i.$$

Следовательно, $\sigma/e=n\mu_n+n^2_i\mu_p/n$.

Это выражение имеет минимум при $\frac{d(\sigma/e)}{dn}=0$, т. е. когда $\mu_n-n^2_i\mu_p/n^2=0$ или $n=n_i\sqrt{\mu_p/\mu_n}$.

Значение $\frac{d^2(\sigma/e)}{dn^2}$ положительно, т. е. это точка перегиба в минимуме

$$p=n^2_i/n=n_i\sqrt{\mu_n/\mu_p}.$$

тода. Докажите, что в этих лампах анодное напряжение влияет на катодный ток слабее, чем в триоде. Определить действующее напряжение в плоскости управляющей сетки и напряжение запирания в лучевом тетроде, если его статический коэффициент усиления $\mu=200$, а прямая проницаемость управляющей сетки $D_1=0{,}1$, напряжение анода $U_а=250$ В, напряжение управляющей сетки $U_{c1}=-3$ В, напряжение экранирующей сетки $U_{c2}=150$ В.

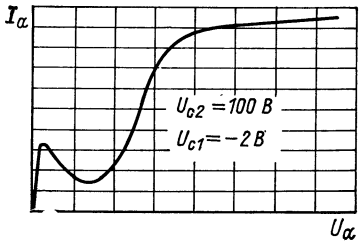


Рис. 5.1.

5.3. Тетрод имеет прямую проницаемость первой сетки $D_1=0{,}05$ и проницаемость второй сетки $D_2=0{,}02$. Пользуясь приближенной формулой, найти напряжение запирания по первой сетке, если анодное напряжение $U_а=250$ В и напряжение экранирующей сетки $U_{c2}=100$ В.

5.4. В чем сущность динатронного эффекта в тетроде? Как он влияет на форму анодных характеристик и эксплуатационные качества тетрода?

5.5. Как изменится ход характеристик тетрода, если на поверхность экранирующей сетки будет нанесено покрытие, увеличивающее вторичную эмиссию с ее поверхности? Проиллюстрируйте это графиками.

5.6. Иногда наблюдается, что ток, текущий в цепи положительно заряженной сетки, отрицателен. Объясните, в каких случаях это возможно в лампах с высоким вакуумом.

5.7. Имеется тетрод, характеристика которого изображена на рис. 5.1. Нанести характеристику, которая получится в том случае, если напряжение экранирующей сетки уменьшить до 50 В, а напряжение управляющей сетки одновременно увеличить таким образом, чтобы катодный ток остался неизменным.

5.8. Характеристика тетрода изображена на рис. 5.1. Нарисуйте примерный вид характеристики, которая получится в том случае, если напряжение управляющей сетки уменьшить до —5 В, а напряжение экранирующей сетки увеличить таким образом, чтобы катодный ток остался неизменным.

5.9. Как нужно соединить между собой электроды тетрода, чтобы он работал: а) как триод с высоким статическим коэффициентом усиления μ; б) как триод с относительно малым статическим коэффициентом усиления?

5.10. Почему при малых катодных токах в лучевом тетроде проявляется динатронный эффект? Почему в лучевом тетроде ток экранирующей сетки составляет около 7% анодного тока (вместо 30% в обычных тетродах)?

5.11. В лучевом тетроде — усилителе мощности, предназначенном для работы с большими анодными токами, расстояние между экранирующей сеткой и анодом меньше, чем в лучевом тетроде, предназначенном для работы с меньшими анодными токами. Почему?

5.12. Если защитную сетку пентода отключить от катода и поочередно подключать ее к аноду или экранирующей сетке, то в каком случае тетродного включения лампы динатронный эффект будет проявляться сильнее?

5.13. В обычном пентоде защитная сетка навивается с довольно большим шагом. Что произойдет со значением минимального анодного напряжения, при котором пентод по токораспределению переходит из режима возврата в режим перехвата, если эту сетку заменить сеткой с меньшим шагом?

5.14. В пентоде управляющая сетка работает при небольшом положительном напряжении. При этом наблюдается, что ток управляющей сетки почти не зависит от анодного напряжения, за исключением тех случаев, когда анодное напряжение мало. Однако при малых значениях этого напряжения уменьшение его вызывает увеличение тока управляющей сетки. Объясните это явление.

5.15. На рис. 5.2 изображена схема для снятия характеристик пентода при положительно заряженной управляющей сетке. Ползунки потенциометров находятся в среднем положении. Как изменится напряжение управляющей сетки, если увеличить напряжение экранирующей сетки U_{c2}? Как изменится напряжение экранирующей сетки U_{c2}, если уменьшать анодное напряжение U_a?

5.16. Используя характеристики лампы 6Ж5П (воспользоваться справочником), определить катодный ток и коэффициент токораспределения в пентоде для двух значений анодного напряжения в режиме перехвата и для двух значений анодного напряжения в режиме возврата. Объяснить: а) почему в пентоде изменение анодного напряжения вызывает малые изменения катодного тока; б) почему в режиме возврата с изменением анодного напряжения происходит значительное изменение коэффициента токораспределения, а в режиме перехвата — незначительное?

5.17. По семейству анодных характеристик пентода 6Ж9П (воспользоваться справочником) построить семейство его анодно-сеточных характеристик для трех значений

У собственного полупроводника

$$\sigma_i = n_i e(\mu_n + \mu_p) = 2{,}5 \cdot 10^{19} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}58 = 2{,}32 \text{ См/м}.$$

Минимальная удельная проводимость

$$\sigma = n_i e \sqrt{(\mu_p \mu_n)} + n_i e \sqrt{(\mu_n \mu_p)} = 2 n_i e \sqrt{\mu_p \mu_n} =$$
$$= 2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{19} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \sqrt{0{,}39 \cdot 0{,}19} = 2{,}18 \text{ См/м}.$$

Удельная проводимость равна собственной, когда

$$n\mu_n + n^2_i e \mu_p / n = n_i e(\mu_n + \mu_p)$$

или

$$n^2 \mu_n - n n_i(\mu_n + \mu_p) + n^2_i \mu_p = 0,$$

т. е.

$$n = \frac{n_i(\mu_n + \mu_p) \pm \sqrt{[n^2_i(\mu_n + \mu_p)^2 - 4\mu_n n^2_i \mu_p]}}{2\mu_n}.$$

Подставив в это выражение числовые данные, получим:

$$n = \frac{n_i}{0{,}78}(0{,}58 \pm \sqrt{[(0{,}58)^2 - 4(0{,}39)(0{,}19)]} =$$
$$= \frac{n_i}{0{,}78}(0{,}58 \pm 0{,}2).$$

Но $n \neq n_i$. Следовательно,

$$n \approx n_i/2 = 1{,}25 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3};$$
$$p = n^2_i/n = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

6.44. В собственном германиевом полупроводнике при $T = 300$ К подвижность электронов $\mu_n = 3900$ см²/(В·с), а подвижность дырок $\mu_p = 1900$ см²/(В·с). Найти концентрацию пар электрон — дырка, если измеренная удельная проводимость образца равна 0,01 См/см.

6.45. Определить: а) какая концентрация атомов-акцепторов (на 1 см³) требуется для получения в германии удельной проводимости 1 мСм/см при $T = 300$ К; б) каково при этом отношение атомов акцепторной примеси к атомам германия; в) какова будет удельная проводимость, если германий содержит в такой же пропорции атомы донорной примеси?

6.46. Определить концентрацию дырок и электронов в германии p-типа при $T = 300$ К, если его удельная проводимость $\sigma_p = 100$ См/см.

6.47. Решить задачу 6.46 для кремния n-типа, если его удельная проводимость составляет 0,1 См/см.

6.48. Собственный германий имеет удельную проводимость 3,56 См/м при $T=310$ К и 0,42 См/м при $T=273$ К. Образец германия n-типа имеет $2\cdot10^{21}$ ионизированных атомов донора на 1 м^3 при этих двух температурах. Вычислить удельную проводимость такого легированного образца. Подвижность электронов 0,38 м^2/(В·с), а дырок в германии 0,18 м^2/(В·с).

Решение. Удельная проводимость $\sigma=e(n\mu_n+p\mu_p)$.

Для собственного германия $n=p=n_i$ и $\sigma_i=n_ie(\mu_n+\mu_p)$, откуда

$$n_i=\sigma_i/[e(\mu_n+\mu_p)].$$

При $T=310$ К

$$n_i=3{,}56/[1{,}602\cdot10^{-19}(0{,}38+0{,}18)]=40\cdot10^{18}\ \text{м}^{-3}.$$

При $T=273$ К

$$n_i=0{,}42/[1{,}602\cdot10^{-19}(0{,}38+0{,}18)]=4{,}7\cdot10^{18}\ \text{м}^{-3}.$$

В легированном материале n-типа концентрация электронов n практически равна концентрации ионизированных атомов донора, т. е. $2\cdot10^{21}$ м$^{-3}$.

В примесном n-полупроводнике

$$n\gg n_i\gg p.$$

Воспользовавшись соотношением $np=n^2_i$, найдем концентрацию дырок.

При $T=310$ К

$$p=n^2_i/n=(40\cdot10^{18})^2/(2\cdot10^{21})=80\cdot10^{16}\ \text{м}^{-3}.$$

Удельная проводимость

$$\sigma=1{,}602\cdot10^{-19}(2\cdot10^{21}\cdot0{,}38+80\cdot10^{16}\cdot0{,}18)=122\ \text{См/м}.$$

При $T=273$ К

$$p=n^2_i/n=(4{,}7\cdot10^{18})^2/(2\cdot10^{21})=1{,}1\cdot10^{16}\ \text{м}^{-3},$$

$$\sigma=1{,}602\cdot10^{-19}(2\cdot10^{21}\cdot0{,}38+1{,}1\cdot10^{16}\cdot0{,}18)=122\ \text{См/м}.$$

6.49. Объясните процесс прохождения тока в собственном полупроводнике. Поясните тот факт, что при малых и средних значениях напряжений ток пропорционален напряжениям, в то время как при больших приложенных напряжениях ток мало зависит от них.

6.50. Плотность пар электрон — дырка в собственном германии, образованных вследствие тепловой генерации, определяется по формуле $n_i=3{,}71\cdot10^{15}\,T^{3/2}e^{-E_g/(2kT)}$, см$^{-3}$,

анодного напряжения (50, 100 и 150 В). Сравнить взаимное расположение характеристик и объяснить их.

5.18. Справедливо ли для экранированных ламп уравнение $SR_iD=1$ ($D=D_1D_2$ для тетрода и $D=D_1D_2D_3$ для пентода)?

5.19. Лучевой тетрод 6П6С работает при напряжении экранирующей сетки $U_{c2}=200$ В, анодном напряжении $U_a=200$ В и напряжении управляющей сетки $U_{c1}=-10$ В.

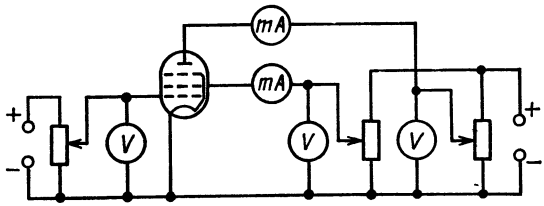


Рис. 5.2.

Определить крутизну характеристики S, внутреннее сопротивление R_i и статический коэффициент усиления μ в рабочей точке. Повторить вычисления для триодного включения тетрода (анод соединен с экранирующей сеткой) при таких же напряжениях анода и управляющей сетки. Сравнить результаты. Характеристики взять из справочника.

5.20. Используя семейство анодных характеристик лучевого тетрода 6П36С (см. справочник), определить параметры лампы S, R_i и μ, а также мощность P_a, выделяемую на аноде, мощность P_{c2}, выделяемую на экранирующей сетке, при напряжении управляющей сетки $U_{c1}=-8$ В и анодном напряжении $U_a=200$ В в импульсном режиме при скважности, равной 10.

5.21. Пользуясь справочником, определить внутреннее сопротивление тетрода 6Э12Н при $U_a=10$ В и $U_{c1}=0$. Что означает этот результат?

5.22. Пользуясь семейством анодных характеристик пентода 6Ж4, изображенным на рис. 5.3, определить его параметры для режимов токораспределения возврата и перехвата. Какой из этих режимов рабочий и почему?

5.23. Почему в экранированных лампах при повышении анодного напряжения увеличиваются значения параметров μ и R_i?

5.24. Почему при повышении напряжения экранирующей сетки крутизна характеристик экранированных ламп увеличивается, а внутреннее сопротивление уменьшается?

5.25. Предложите хотя бы один способ, с помощью которого можно было бы обеспечить в лампе переменную крутизну, исключая способ, при котором управляющую сетку навивают с переменным шагом.

5.26. Промышленностью не выпускаются триоды переменной крутизны. Объясните, как нужно соединить электроды пентода переменной крутизны, чтобы получить лампу с характеристиками триода переменной крутизны.

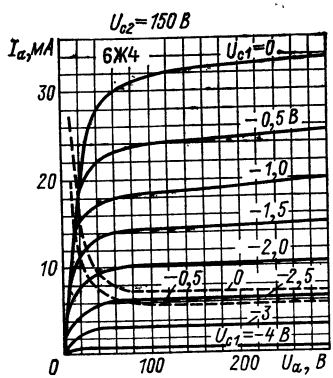


Рис. 5.3.

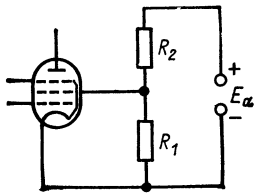


Рис. 5.4.

5.27. Напряжение на экранирующую сетку подается через резистор сопротивлением R_{c2}=50 кОм от источника анодного питания E_a=240 В. Определить напряжение экранирующей сетки, если ток экранирующей сетки I_{c20}= =3 мА.

5.28. На экранирующую сетку надо подать напряжение 80 В от источника анодного питания E_a=300 В. Ток экранирующей сетки I_{c20}=0,5 мА. Определить абсолютное и относительное изменение напряжения экранирующей сетки U_{c20} при увеличении тока экранирующей сетки до 0,55 мА, если питание экранирующей сетки осуществляется: а) через резистор; б) через делитель напряжения (рис. 5.4), потребляющий ток 3 мА.

5.29. Экранирующая сетка питается через делитель напряжения (рис. 5.4). Определить: а) как изменится напряжение экранирующей сетки, если произойдет обрыв в цепи R_1; б) что произойдет с напряжением экранирующей сетки, если будет обрыв в цепи R_2; в) в какую сторону от номинальных значений изменятся параметры лампы S, R_i, μ и $D=D_1D_2D_3$ при обрыве в цепи R_1 или в цепи R_2?

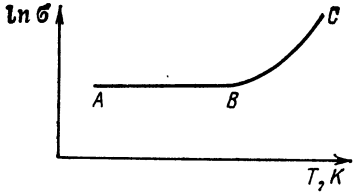


Рис. 6.1.

где E_g — ширина запрещенной зоны, эВ; T — температура, К; k — постоянная Больцмана. Рассчитайте плотность пар электрон — дырка для температур 200, 300 и 400 К. Предположить, что ширина запрещенной зоны не изменяется при изменении температуры.

6.51. Эксперимент показывает, что удельная проводимость полупроводника зависит от температуры по закону, показанному на рис. 6.1. Объясните форму кривой. Чем различаются области AB и BC?

6.52. Было обнаружено, что удельное сопротивление собственного германия ρ изменяется с температурой T следующим образом:

T, К	385	458	556	714
ρ, Ом·м	0,028	0,0061	0,0013	0,00027

Определить ширину запрещенной зоны E_g в германии, предполагая, что она не изменяется с температурой. Предположите, что подвижности электронов и дырок, μ_n и μ_p, изменяются пропорционально $T^{-3/2}$.

Решение. Удельная проводимость собственного полупроводника

$$\sigma = 1/\rho = en_i(\mu_p + \mu_n),$$

где собственная концентрация n_i изменяется с температурой как $e^{-E_g/2kT}$ Следовательно,

$$\frac{1}{\rho} = C^{-1}e^{-E_g/(2kT)}T^{-3/2}$$

или

$$\rho = Ce^{E_g/(2kT)}T^{3/2},$$

где $C = \text{const}$,

или

$$\ln(\rho T^{-3/2}) = \ln C + E_g/(2kT).$$

Следовательно, если предположение правильно, то график $\ln(\rho T^{-3/2})$ от $1/T$ должен представлять собой прямую линию с наклоном $E_g/(2k)$. Данные для построения графика имеются в условии задачи, т. е. график будет иметь вид прямой с наклоном 4670 К.

Тогда E_g находим из выражения

$E_g/(2k)=4670$ К; $E_g=2\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 4670/(1{,}6\cdot 10^{-19})=0{,}8$ эВ.

6.53. Сравнить концентрации свободных электронов в собственных германии и кремнии при температурах 40 и 80 °С с концентрациями их при температуре 300 К. Пренебрегите изменением эффективных плотностей состояний в зонах проводимости и валентной N_c и N_v при изменении температуры. Ширина запрещенной зоны в германии $E_g=0{,}72$ эВ, в кремнии $E_g=1{,}12$ эВ. Определить значения удельного сопротивления при указанных температурах (температурные изменения подвижности не учитывать). Удельные сопротивления собственных германия и кремния при комнатной температуре принять равными 0,45 и 2×10^3 Ом·м соответственно.

Решение. Концентрация собственных носителей заряда n_i определяется из выражения

$$n_i^2=N_cN_ve^{-E_g/(kT)}.$$

Так как эффективные плотности состояний N_c и N_v слабо зависят от температуры, то $N_cN_v=\text{const}$.

Найдем отношения концентраций собственных носителей заряда при разных температурах для германия ($E_g=0{,}72$ эВ).

При $T=300$ К $kT=0{,}86\cdot 10^{-4}\cdot 300=0{,}0258$ эВ.

При $T_1=40$ °С$=313$ К $kT_1=0{,}0269$ эВ.

Следовательно,

$$\frac{n_i(313\text{ К})}{n_i(300\text{ К})}=\left[\frac{e^{-0{,}72/0{,}0269}}{e^{-0{,}72/0{,}0258}}\right]^{1/2}=1{,}77.$$

При $T_2=80$ °С$=353$ К $kT_2=0{,}0304$ эВ. Тогда

$$\frac{n_i(353\text{ К})}{n_i(300\text{ К})}=\left[\frac{e^{-0{,}72/0{,}0304}}{e^{-0{,}72/0{,}0258}}\right]^{1/2}=8{,}3.$$

Аналогично вычисляем отношения концентраций собственных носителей заряда для кремния ($E_g=1{,}12$ эВ)

$$\frac{n_i(313\text{ К})}{n_i(300\text{ К})}=\left[\frac{e^{-1{,}12/0{,}0269}}{e^{-1{,}12/0{,}0258}}\right]^{1/2}=2{,}43.$$

$$\frac{n_i(353\text{ К})}{n_i(300\text{ К})}=\left[\frac{e^{-1{,}12/0{,}0304}}{e^{-1{,}12/0{,}0258}}\right]^{1/2}=26{,}7.$$

5.30. Рассчитать сопротивления резисторов делителя для питания экранирующей сетки пентода 6К7 (рис. 5.4), если напряжение источника анодного питания $E_а$=250 В, напряжение экранирующей сетки $U_{с20}$=125 В. Ток делителя $I_{дел}$=2 мА, напряжение смещения $E_с$=—2 В, анодное напряжение $U_{а0}$=250 В.

5.31. Пересчитать семейство анодных характеристик пентода 6Ж32П, снятых при напряжении экранирующей сетки $U_{с2}$=140 В (рис. 5.5), на семейство анодных характеристик, снятое при напряжении экранирующей сетки $U''_{с2}$=100 В.

Решение. Возможность пересчета семейства анодных характеристик на новое семейство, снятое при другом напряжении экранирующей сетки, основана на законе подобия. Согласно этому закону изменение напряжения на всех электродах лампы в одинаковое число раз не изменяет относительной картины электрического поля в междуэлек-

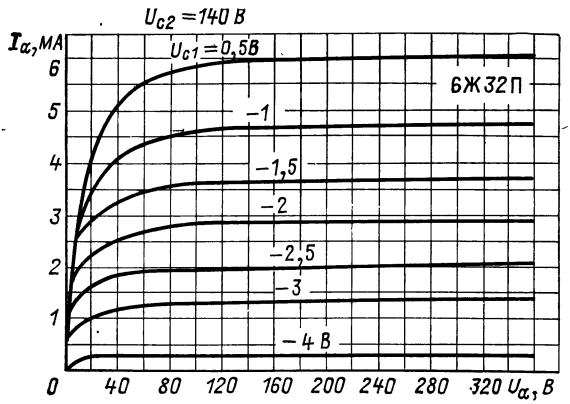


Рис. 5.5.

тродном пространстве, формы электронных траекторий и распределения электронного потока по электродам лампы (коэффициент токораспределения).

Предположим, что напряжение на всех электродах, а следовательно, действующее напряжение $U_д$ изменилось в n раз и поэтому общий катодный ток изменился в m раз. Поскольку коэффициент токораспределения остался при этом прежним, то анодный ток $I_а$ и ток экранирующей сетки $I_{с2}$ тоже изменятся в m раз. Следовательно, для пересчета семейства анодных характеристик на другое, снятое при каком-то другом значении напряжения экранирующей

сетки, надо знать множитель тока m для заданного множителя напряжения n.

Для определения множителя тока m по заданному множителю напряжения n необходимо иметь характеристику пентода в триодном включении [$I_a=f(U_{c2})$ при $U_{c1}=U_{c3}=0$] при анодном напряжении, равном заданному напряжению экранирующей сетки ($U_a=U_{c2}$).

1. Определяем множитель напряжения n (коэффициент изменения напряжений экранирующей сетки):

$$n=U''_{c2}/U'_{c2}=100/140=0{,}72.$$

2. Используя анодные характеристики пентода в триодном включении (рис. 5.6), по анодной характеристике, снятой при $U_{c1}=0$, находим токи для $U_a=U'_{c2}=140$ В и для $U_a=U''_{c2}=100$ В. Из рисунка видно, что при $U_a=U'_{c2}=140$ В анодный ток $I'_a=8{,}5$ мА и при $U_a=U''_{c2}=100$ В $I''_a=5{,}8$ мА.

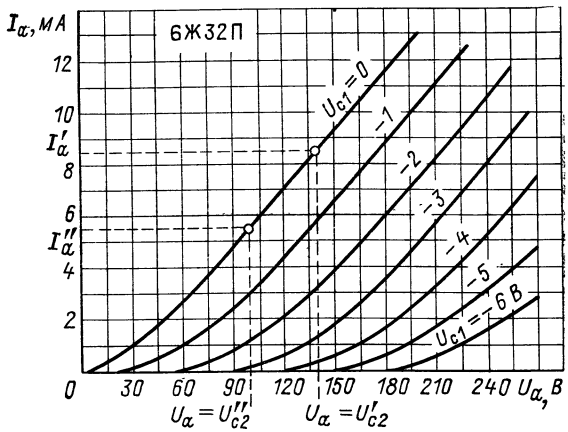


Рис. 5.6.

3. Определяем множитель тока (коэффициент изменения анодных токов) m:

$$m=I''_a/I'_a=5{,}8/8{,}5=0{,}68.$$

4. Значения всех анодных токов и анодных напряжений на семействе анодных характеристик пентода, снятом при $U_{c2}=140$ В (см. рис. 5.5), умножаем соответственно на коэффициенты m и n. Полученное таким образом новое семейство анодных характеристик изображено на рис. 5.7.

Удельное сопротивление собственного германия определяется выражением

$$\rho(300\ \text{K})=0{,}45\ \text{Ом}\cdot\text{м}=1/[n_i e(\mu_n+\mu_p)].$$

Предполагая, что μ_p и μ_n не зависят от температуры, получаем:

$$\rho(313\ \text{K})/\rho(300\ \text{K})=n_i(300\ \text{K})/n_i(313\ \text{K}).$$

При температуре 40 °C (313 K)

$$\rho(313\ \text{K})=n_i(300\ \text{K})\rho(300\ \text{K})/n_i(313\ \text{K})=$$
$$=0{,}45/1{,}77=0{,}254\ \text{Ом}\cdot\text{м}.$$

Аналогично находим ρ при температуре 80 °C (353 K):

$$\rho(353\ \text{K})=0{,}45/8{,}3=0{,}054\ \text{Ом}\cdot\text{м}.$$

Для кремния при тех же температурах имеем:

$$\rho(313\ \text{K})=823\ \text{Ом}\cdot\text{м и}\ \rho(353\ \text{K})=74{,}9\ \text{Ом}\cdot\text{м}.$$

6.54. Измерение удельной проводимости германия показало, что она изменяется с температурой по закону $e^{-4350/T}$. Требуется определить ширину запрещенной зоны германия.

6.55. В собственном германии ширина запрещенной зоны равна 0,72 эВ. На сколько надо повысить температуру по сравнению с 300 K, чтобы число электронов проводимости увеличилось в 2 раза? Объясните качественно температурную зависимость числа электронов проводимости в полупроводнике n-типа для широкого интервала температур.

6.56. Кристалл собственного германия находится при температуре 300 K. На сколько процентов увеличится удельная проводимость германия при увеличении температуры на 1%?

6.57. Решить предыдущую задачу для собственного кремния.

6.58. При какой температуре концентрация собственных носителей n_i в кремнии будет равна концентрации собственных носителей в германии при T=300 K?

6.59. Определить среднюю скорость дрейфа электронов и дырок в германии при T=300 K, если к образцу приложено внешнее электрическое поле с напряженностью E=10, 100 и 1000 В/см.

6.60. Решить предыдущую задачу для кремния.

6.61. Определите и сравните скорость дрейфа электрона, движущегося в электрическом поле с напряженностью 10 кВ/м в собственном германии, с его скоростью при движении на расстоянии 10 мм в таком же поле в вакууме.

Подвижность электрона принять равной $\mu_n=0{,}39$ м^2/(В·с).

6.62. Образец германия имеет концентрацию доноров $N_д=2\cdot10^{20}$ м$^{-3}$. Эффективная масса электрона равна 1,57 m_0, а донор можно считать рассеивающим центром с $r=5\cdot10^{-2}$ мкм. Чему равны средняя длина свободного пробега и среднее время между столкновениями при 300 К? Определить подвижность электронов.

Решение. Средняя длина свободного пробега $\lambda=1/(N\pi r^2)$, где r — радиус сферического рассеивающего центра, а N — концентрация носителей заряда. В данном случае

$$\lambda=1/(2\cdot10^{20}\pi\cdot25\cdot10^{-16})=0{,}64\cdot10^{-6}\text{ м}.$$

Среднее время между столкновениями $\tau=\lambda/\bar{c}$, где $\bar{c}$ — средняя скорость электронов. Известно также, что

$$(1/2)m^*(\bar{c})^2=(3/2)kT;$$

$$\tau=\lambda(m^*/3kT)^{1/2}=0{,}64\cdot10^{-6}\left(\frac{1{,}57\cdot9{,}106\cdot10^{-31}}{3\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300}\right)^{1/2}=$$
$$=0{,}69\cdot10^{-11}\text{ с}.$$

Подвижность

$$\mu=\frac{e\tau}{m^*}=\frac{1{,}602\cdot10^{-19}\cdot0{,}69\cdot10^{-11}}{1{,}57\cdot9{,}106\cdot10^{-31}}=0{,}77\text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с}).$$

6.63. Брусок кремния размером 10×10×10 мм^3 при $T=300$ К содержит в качестве примесей галлий с концентрацией $N_а=10^{19}$ атомов/м^3 и мышьяк с концентрацией $N_д=1{,}5\cdot10^{19}$ атомов/м^3. Определить сопротивление бруска между двумя противоположными сторонами, если концентрация собственных носителей заряда $n_i=1{,}5\cdot10^{16}$ м$^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n=0{,}12$ м^2/(В·с) и подвижность дырок $\mu_p=0{,}05$ м^2/(В·с).

6.64. Образец германия содержит в качестве примесей 10^{20} донорных атомов в 1 м^3 и $7\cdot10^{19}$ акцепторных атомов в 1 м^3. При температуре образца удельное сопротивление собственного германия равно 0,6 Ом·м. Определить плотность полного дрейфового тока, если к образцу приложено электрическое поле напряженностью 200 В/м. Подвижность электронов $\mu_n=0{,}38$ м^2/(В·с), подвижность дырок $\mu_p=0{,}18$ м^2/(В·с).

6.65. Определить значение дрейфового тока, протекающего через кремниевый стержень длиной 5 см и с поперечным сечением 0,5×0,5 см^2, к концам которого приложена разность потенциалов 6 В. Кремний n-типа. Концентрация электронов проводимости в нем равна 10^{22} м$^{-3}$, концентра-

ция собственных носителей равна $2{,}05 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$. Температура T=300 К. Коэффициенты диффузии электронов и дырок при этой температуре соответственно равны $0{,}31 \times 10^{-2}$ и $0{,}065 \cdot 10^{-2}$ м^2/с.

6.66. Дрейфовый ток плотностью 0,1 А/см^2 течет через кристалл германия n-типа с удельным сопротивлением 5 Ом·см. За какое время электроны пройдут расстояние 5 мкм?

6.67. Дрейфовый ток плотностью 10 мА/см^2 течет через кристалл кремния p-типа с удельным сопротивлением 5 Ом·см. Найти среднюю дрейфовую скорость дырок и электронов.

6.68. Образец из полупроводника прямоугольной формы размером $0{,}25 \times 0{,}25 \times 0{,}05$ см^3 содержит 10^{15} носителей заряда в 1 см^3 при 20 °С. К двум противоположным узким граням приложено напряжение 20 В. Найти значение тока, полагая подвижность носителей зарядов равной 500 см^2/(В·с).

6.69. Определить отношение электронного дрейфового тока к дырочному дрейфовому току при комнатной температуре (T=300 К) для: а) собственного германия; б) собственного кремния; в) германия n-типа с удельным сопротивлением ρ=5 Ом·см; г) кремния n-типа с удельным сопротивлением ρ=5 Ом·см; д) германия p-типа с удельным сопротивлением ρ=5 Ом·см.

6.70. Подвижности электронов μ_n и дырок μ_p в монокристалле кремния при комнатной температуре (T=300 К) соответственно равны 1400 и 500 см^2/(В·с). Определить коэффициенты диффузии электронов и дырок при этой температуре.

6.71. В образце германия n-типа концентрация донорной примеси при комнатной температуре (300 К) составляет $N_д=10^{17}$ см$^{-3}$. Определите значение p_n и диффузионную длину электронов L_n, если время их жизни τ_n=50 мкс.

6.72. Определите время жизни τ_n и подвижность электронов μ_n при T=300 К, если длина диффузионного смещения электронов в германии L_n=0,15 см, а коэффициент диффузии D_n=93 см^2/с.

6.73. Определите время жизни τ_p и подвижность дырок в кремнии p-типа при комнатной температуре, если длина диффузионного смещения дырок L_p=0,07 см, а концентрация акцепторной примеси $N_а=1 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$.

6.74. Определить длину диффузионного смещения L_n и коэффициент диффузии электронов D_n в германии при комнатной температуре, если время жизни электронов τ_n=500 мкс, а подвижность электронов μ_n=3600 см^2/(В·с).

6.75. Определите подвижность электронов в кремнии при температуре $T=300$ К, если коэффициент диффузии электронов $D_n=31$ см^2/с.

6.76. Определите, как изменится время жизни τ носителей заряда в невырожденном полупроводнике при изменении концентрации примеси, если известно, что при $T=$ $=\text{const}=300$ К их подвижность увеличилась на 5%, а диффузионная длина на 10%.

6.77. На сколько изменится коэффициент диффузии невырожденного полупроводника, если при увеличении температуры на 10% подвижность носителей изменилась на 1%?

6.78. Определите плотность диффузионного тока в германиевом стержне длиной 10 см. Концентрация свободных электронов и дырок изменяется по линейному закону, причем концентрация электронов на одном конце стержня равна $5\cdot10^{23}$ м$^{-3}$, а на другом 10^{20} м$^{-3}$.

6.79. Определите длину диффузионного смещения электрона при $T=300$ К в кристалле германия n-типа, если подвижность электронов $\mu_n=3900$ см^2/(В·с), а время их жизни $\tau_n=100$ мкс.

6.80. В кремниевом образце n-типа с удельным сопротивлением $\rho=3$ Ом·см при $T=300$ К время жизни неосновных носителей заряда $\tau_p=5$ мкс. В одну из плоскостей образца вводится и поддерживается постоянной во времени избыточная концентрация дырок $p=10^{13}$ см$^{-3}$. Найти плотность тока диффузии в непосредственной близости от этой плоскости полупроводника. На какой глубине концентрация дырок будет равна 10^{12} см$^{-3}$? Считать, что длина образца значительно больше диффузионной длины носителей заряда.

6.81. На одной стороне образца германия n-типа имеется инжектирующий контакт. При некотором напряжении смещения концентрация дырок у контакта увеличивается до 10^{20} м$^{-3}$. Удельное сопротивление образца $\rho=2\times$ $\times10^{-2}$ Ом·м, время жизни носителей $\tau=10^{-4}$ с, подвижность электронов $\mu_n=0{,}36$ м^2/(В·с), подвижность дырок $\mu_p=0{,}17$ м^2/(В·с) и концентрация собственных носителей $n_i=1{,}3\cdot10^{19}$ м$^{-3}$.

Определить: а) отношение концентраций основных и неосновных носителей заряда; б) диффузионную длину для дырок; в) плотность дырочного тока.

6.82. Образец дырочного антимонида индия имеет подвижность электронов 6,2 м^2/(В·с) при $T=290$ К. Вычислить диффузионную длину неосновных носителей заряда, если их время жизни $\tau=3\cdot10^{-8}$ с.

6.83. Напряженность электрического поля в кристалле собственного кремния $E=500$ В/м, а подвижности электронов μ_n и дырок μ_p соответственно равны 0,14 и 0,05 м²/(В·с). Концентрация собственных носителей $n_i=1{,}5\cdot10^{16}$ м⁻³. Определить: а) скорости дрейфа электронов v_n и дырок v_p; б) удельное сопротивление кремния ρ_i; в) полный дрейфовый ток I, если площадь поперечного сечения $\Pi=3\cdot10^{-6}$ м².

Решение. а) Скорость дрейфа электронов

$$v_n=\mu_n E=0{,}14\cdot500=70 \text{ м/с}.$$

б) Скорость дрейфа дырок

$$v_p=\mu_p E=0{,}05\cdot500=25 \text{ м/с}.$$

в) Удельное сопротивление собственного кремния

$$\rho_i=\frac{1}{\sigma_i}=\frac{1}{n_i e(\mu_n+\mu_p)}=$$

$$=\frac{1}{1{,}5\cdot10^{16}\cdot1{,}602\cdot10^{-19}(0{,}14+0{,}05)}=2.2\cdot10^3 \text{ Ом·м}.$$

г) Полный дрейфовый ток в собственном полупроводнике

$$I=n_i eE(\mu_n+\mu_p)\Pi=$$

$$=1{,}5\cdot10^{16}\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot500\cdot0{,}19\cdot3\cdot10^{-6}=$$

$$=6{,}84\cdot10^{-7} \text{ А}=0{,}684 \text{ мкА}.$$

6.84. Вычислить диффузионную длину электронов в германии p-типа и дырок в германии n-типа, если время жизни неосновных носителей заряда $\tau_n=\tau_p=10^{-4}$ с, коэффициенты диффузии для германия p-типа $D_n=99\cdot10^{-4}$ м²/с и для германия n-типа $D_p=47\cdot10^{-4}$ м²/с.

Решение. Из выражения

$$D_n\tau_n=L^2{}_n$$

находим диффузионную длину электронов

$$L_n=\sqrt{D_n\tau_n}=\sqrt{99\cdot10^{-4}\cdot10^{-4}}=0{,}99 \text{ мм}.$$

Диффузионная длина дырок

$$L_p=\sqrt{D_p\tau_p}=\sqrt{47\cdot10^{-4}\cdot10^{-4}}=0{,}69 \text{ мм}.$$

6.85. Удельное сопротивление германиевого образца n-типа длиной 1 см и площадью поперечного сечения 1 мм² равно 0,2 Ом·м, время жизни неосновных носителей заряда $\tau=100$ мкс. На образец падает монохроматический свет

с длиной волны $\lambda=0{,}546$ мкм. На этой длине волны световой поток в 1 лм эквивалентен 0,0016 Вт. Считая, что весь падающий на образец свет полностью расходуется на генерацию электронно-дырочных пар, определить, какой световой поток должен падать на боковую поверхность образца, чтобы уменьшить его сопротивление вдвое. Квантовый выход принять равным единице.

Решение. Чтобы узнать, какое количество носителей заряда должно быть добавлено путем световой генерации для увеличения вдвое удельной проводимости образца, найдем вначале концентрацию носителей заряда в темноте. Используя выражение для определения удельной проводимости и соотношение $n^2_i=np$, можно записать:

$$\sigma=1/\rho=e(n\mu_n+p\mu_p)=$$
$$=e[n\mu_n+n^2_i/(n\mu_p)]. \qquad (1)$$

Для германия при комнатной температуре (см. приложение 3) $n^2_i=6{,}25\cdot10^{38}$ м$^{-3}$; $\mu_n=0{,}39$ м^2/(В·с) и $\mu_p=0{,}19$ м^2/(В·с).

Подставив известные величины в (1), получим:

$$\sigma=1/\rho=1/0{,}2=1{,}6\cdot10^{-19}(n\cdot0{,}39+$$
$$+6{,}25\cdot10^{38}\cdot0{,}19/n)$$

или

$$1/0{,}2=1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}39n+1{,}6\cdot10^{-19}\times$$
$$\times6{,}25\cdot10^{38}\cdot0{,}19/n. \qquad (2)$$

Преобразовав (2), получим:

$$1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}39n^2-5n+6{,}25\cdot10^{38}\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}19=0.$$

Решив это уравнение относительно n, найдем концентрацию электронов в образце полупроводника n-типа:

$$n=\frac{5+[5^2-(4\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}39\cdot6{,}25\cdot10^{38}\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}19)]^{1/2}}{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}39}=$$
$$=7{,}6\cdot10^{19}\ \text{м}^{-3}.$$

Концентрация дырок

$$p=n^2_i/n=6{,}25\cdot10^{38}/(7{,}6\cdot10^{19})=8{,}2\cdot10^{18}\ \text{м}^{-3}.$$

Под действием света в образце будет генерироваться равное число электронов и дырок, поэтому прирост электронов и дырок в (1) должен быть одинаковым, т. е. $\Delta n=\Delta p$.

Следовательно, удельная проводимость освещенного образца

$$\sigma=2\cdot5=e(\Delta n+7{,}6\cdot10^{19})\mu_n+e(\Delta n+8{,}2\cdot10^{18})\mu_p \qquad (3)$$

или

$$10=1{,}6\cdot10^{-19}\Delta n\cdot0{,}39+1{,}6\cdot10^{-19}\cdot7{,}6\cdot10^{19}\cdot0{,}39+$$
$$+1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}19\Delta n+1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}19\cdot8{,}2\cdot10^{18},$$

откуда $\Delta n=5{,}4\cdot10^{19}$ м$^{-3}$.

Здесь Δn — динамическая равновесная величина при непрерывном световом возбуждении.

В объеме образца $1\cdot10^{-2}\cdot10^{-6}=10^{-8}$ м$^{-3}$ должен быть создан избыток электронов, равный $5{,}4\cdot10^{11}$, и точно такой же избыток дырок. Эти избыточные носители заряда исчезают согласно условию задачи со скоростью $5{,}4\cdot10^{11}/\tau=$ $=5{,}4\cdot10^{11}\cdot10^{-4}=5{,}4\cdot10^{15}$ с$^{-1}$.

Следовательно, чтобы поддерживать необходимое динамическое равновесие, на боковую поверхность образца должно поступать $5{,}4\cdot10^{15}$ фотонов в секунду.

Поскольку по условию задачи при длине волны $\lambda=$ $=0{,}546$ мкм световой поток в 1 лм эквивалентен 0,0016 Вт, то можно определить световой поток

$$\Phi=\frac{5{,}4\cdot10^{15}h\nu}{0{,}0016}=\frac{5{,}4\cdot10^{15}hc/\lambda}{0{,}0016}=$$
$$=\frac{5{,}4\cdot10^{15}\cdot6{,}62\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^{8}}{0{,}0016\cdot0{,}546\cdot10^{-6}}=1{,}2 \text{ лм}.$$

6.86. В полупроводниковом кристалле под действием света образуется равномерно распределенная избыточная концентрация носителей заряда Δn. Равновесная концентрация неосновных носителей заряда составляет $2{,}5\times$ $\times10^{20}$ м$^{-3}$, а начальная скорость уменьшения концентрации равна $2{,}8\cdot10^{24}$ с$^{-1}$. Определить: а) время жизни неосновных носителей заряда; б) значение Δn через 2 мс после выключения источника света.

Решение. а) Временная зависимость концентрации избыточных носителей заряда описывается выражением

$$\Delta n(t)=\Delta n(0)\,e^{-t/\tau}, \qquad (1)$$

где $\Delta n(0)$ — избыточная концентрация носителей в момент выключения источника света; τ — время жизни.

Продифференцируем (1) по t:

$$\frac{d\Delta n(t)}{dt}=-\frac{\Delta n(0)}{\tau_n}e^{-t/\tau_n}, \qquad (2)$$

где τ_n — время жизни электронов в полупроводнике p-типа.

Начальная скорость уменьшения концентрации определяется из (2), если положить $t=0$, т. е.

$$\left.\frac{d\Delta n(t)}{dt}\right|_{t=0} = -\frac{\Delta n(0)}{\tau_n} = 2{,}8\cdot 10^{24}\ \text{с}^{-1}.$$

Поскольку равновесная концентрация неосновных носителей заряда согласно условию задачи $\Delta n(0)=2{,}5\cdot 10^{20}\ \text{м}^{-3}$, находим, что время жизни неосновных носителей заряда

$$\tau_n = \left.\frac{\Delta n(0)}{d\Delta n/dt}\right|_{t=0} = 2{,}5\cdot 10^{20}/(2{,}8\cdot 10^{24}) = 89\ \text{мкс}.$$

б) Избыточная концентрация носителей заряда через 2 мс после выключения источника света Δn ($t=2\cdot 10^{-3}$ с) вычисляется по формуле (1):

$$\Delta n = 2{,}5\cdot 10^{20} e^{-2\cdot 10^{3}/(89\cdot 10^{-6})} =$$
$$= 2{,}5\cdot 10^{20} e^{-22{,}4} = 4{,}4\cdot 10^{10}\ \text{м}^{-3}.$$

6.87. К полупроводнику приложено электрическое поле вдоль положительного направления оси x. В каком направлении по отношению к полю будут двигаться свободные электроны и дырки? В каком направлении пойдет электронный и дырочный ток?

6.88. К полупроводнику, рассмотренному в предыдущей задаче, кроме электрического поля, приложено магнитное поле вдоль положительного направления оси y, направленной по нормали к оси x. В каком направлении по отношению к магнитному полю отклонятся в первый момент электроны и дырки?

Опишите эксперимент, который позволил бы определить знак и концентрацию основных носителей заряда в полупроводниковом образце. Пусть дан образец германия длиной 1 см (по оси x), шириной 9 мм (по оси y) и толщиной 0,2 мм (по оси z). К торцам образца прикладывается разность потенциалов 1,4 В, и в положительном направлении оси x протекает ток 10 мА. При наличии вдоль оси z магнитного поля с индукцией $B=0{,}1$ Тл на гранях образца, перпендикулярных оси y, появляется ЭДС Холла, $U_н=10$ мВ. Определить: а) постоянную (коэффициент) Холла; б) знак носителей заряда; в) концентрацию носителей; г) дрейфовую подвижность носителей.

6.89. Коэффициент Холла образца примесного кремния равен $3{,}66\cdot 10^{-4}\ \text{м}^3/\text{Кл}$, удельное сопротивление образца $\rho=9{,}93\cdot 10^{-3}$ Ом·м. Определить концентрацию и подвижность носителей заряда, предполагая, что эти носители одного знака.

6.90. Образец полупроводника имеет коэффициент Холла $R_H=3{,}66\cdot10^{-4}$ м^3/Кл и удельное сопротивление $\rho=8{,}93\cdot10^{-3}$ Ом·м. Для обнаружения эффекта Холла образец помещается в магнитное поле с индукцией $B=0{,}5$ Тл. Определить угол Холла.

6.91. Образец полупроводника длиной 30 мм, шириной 5 мм и толщиной 1 мм имеет сопротивление 500 Ом. При помещении его в магнитное поле с индукцией $B=0{,}5$ Тл, перпендикулярное плоскости пластины, на гранях образца возникает ЭДС Холла 5 мВ при токе через образец 10 мА. Определить подвижность Холла и плотность носителей в полупроводнике, считая, что он является ярко выраженным полупроводником p-типа.

До какого значения изменится ЭДС Холла, если в то же поле поместить образец меди таких же размеров и несущий такой же ток? Концентрация электронов проводимости в меди примерно равна $8{,}5\cdot10^{28}$ м$^{-3}$.

Решение. Удельная проводимость полупроводника

$$\sigma=l/(R\Pi)=pe\mu_н,$$

где l — длина полупроводника; Π — площадь поперечного сечения; R — сопротивление; p — концентрация дырок, если полупроводник p-типа. Коэффициент Холла задается в виде

$$R_H=1/(pe)=U_H d/(IB),$$

где U_H — ЭДС Холла; d — толщина образца;

$$1/(p\cdot1{,}6\cdot10^{-19})=5\cdot10^{-3}\cdot1\cdot10^{-3}/(10\cdot10^{-3}\cdot0{,}5),$$

откуда $p=6{,}25\cdot10^{21}$ м$^{-3}$.

Подставив это значение в первое уравнение, получим:

$$\mu_H=l/(R\Pi pe)=30\cdot10^{-3}/(500\cdot6\cdot10^{-6}\cdot6{,}25\times$$
$$\times10^{21}\cdot1{,}6\cdot10^{-19})=10^{-2}\ м^2/(В\cdot с).$$

Заметьте, что для постоянных размеров образца, поля и тока ЭДС Холла пропорциональна обратному значению концентрации носителей заряда. Следовательно, ЭДС Холла у медного образца

$$U_{H\,Cu}=U_H(1/n)/(1/p)=$$
$$=5\cdot10^{-3}\cdot6{,}25\cdot10^{21}/(8{,}50\cdot10^{28})=0{,}37\ нВ.$$

6.92. Образец германия n-типа, предназначенный для изготовления транзисторов, имеет удельное сопротивление $\rho=1{,}5$ Ом·см и постоянную Холла $R_H=5{,}4\cdot10^3$ см^3/Кл. Определить концентрацию основных носителей заряда и подвижность. Какой еще параметр необходимо знать, что-

бы выяснить возможность использования этого образца для изготовления транзисторов со сплавным переходом? Обнаружено, что при повышении температуры образца постоянная Холла не изменяется, тогда как удельное сопротивление несколько увеличивается, но при некоторой более высокой температуре значения этих величин резко уменьшаются. Объясните такое поведение полупроводника. Что произойдет, если образец охлаждается, а не нагревается?

6.93. Удельное сопротивление легированного кристалла кремния равно $\rho=9{,}27\cdot10^{-3}$ Ом·м и коэффициент Холла $R_H=3{,}8\cdot10^{-4}$ м^3/Кл. Предполагая, что электропроводность в образце создается носителями заряда только одного типа, найти концентрацию и подвижность носителей заряда.

6.94. Полупроводниковый монокристалл толщиной 1 мм и шириной 1 см помещен в магнитное поле с индукцией $B=0{,}5$ Тл. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости образца. Вычислить ЭДС Холла, если коэффициент Холла $R_H=3{,}66\cdot10^{-4}$ м^3/Кл.

6.95. Определить направление термо-ЭДС в полупроводнике, обусловленное неравномерным нагревом его концов, если известно, что основными носителями тока в данном полупроводнике являются дырки.

6.96. Термистор из собственного кремния имеет сопротивление $R_1=600$ Ом при $T=300$ К. Вычислить его сопротивление при $T=325$ К, предполагая, что ширина запрещенной зоны для кремния $E_g=1{,}1$ эВ и что подвижности носителей μ_p и μ_n заметно не изменяются в этом интервале температур.

Решение. Собственная удельная проводимость материала $\sigma_i=n_ie(\mu_n+\mu_p)$, где n_i — собственная концентрация носителей, а μ — подвижность. Если подвижности остаются постоянными, то n_i — только один параметр, меняющийся с температурой T по закону

$$n_i=Ne^{-E_g/(2kT)}, \tag{1}$$

где N — некая постоянная.

Следовательно, удельное сопротивление, а также сопротивление R изменяются как n_i^{-1}, или

$$R=Ce^{E_g/(2kT)}. \tag{2}$$

При $T=300$ К $R=600$ Ом, следовательно,

$$600=Ce^{\frac{1{,}1\cdot1{,}6\cdot10^{-19}}{2\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300}}=Ce^{21{,}3}. \tag{3}$$

Аналогично при $T=325$ К

$$R_2=Ce^{\frac{1,1\cdot 1,6\cdot 10^{-19}}{2\cdot 1,38\cdot 10^{-23}\cdot 325}}=Ce^{19,6}. \qquad (4)$$

Разделив (3) на (4), получим:

$$600/R_2=e^{(21,3-19,6)},$$

откуда $R_2\approx 110$ Ом.

Глава седьмая

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

7.1. Имеется сплавной германиевый p-n-переход с $N_д=10^3 N_а$, причем на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T=300$ К (плотности атомов N и ионизованных атомов n_i принять равными $4,4\cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ и $2,5\cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ соответственно).

Решение. Определим концентрацию акцепторных атомов:

$$N_а=N/10^8=4,4\cdot 10^{22}/10^8=4,4\cdot 10^{14}\ \text{см}^{-3}$$

($N=4,4\cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ — плотность атомов германия).

Концентрация атомов доноров $N_д=10^3 N_а=4,4\cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_к=\frac{kT}{e}\ln\frac{N_а N_д}{n_i^2}=$$

$$=0,0258\ln\frac{4,4\cdot 10^{17}\cdot 4,4\cdot 10^{14}}{(2,5\cdot 10^{13})^2}=0,326\approx 0,33\ \text{В}.$$

7.2. Решить предыдущую задачу для кремниевого p-n-перехода с такими же концентрациями примеси. Значения N и n_i приведены в приложении.

7.3. Удельное сопротивление p-области германиевого p-n-перехода $\rho_p=2$ Ом·см, а удельное сопротивление n-области $\rho_n=1$ Ом·см. Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при $T=300$ К.

Решение. Известно, что удельное сопротивление p-области полупроводника

$$\rho_p=\frac{1}{\sigma_p}\approx\frac{1}{N_а e\mu_p},$$

где $N_а$ — концентрация акцепторов; e — заряд электрона; μ_p — подвижность дырок. Отсюда

$$N_а = \frac{1}{\rho_p e \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 1900} = 1{,}65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию доноров в n-области полупроводника:

$$N_д = \frac{1}{\rho_n e \mu_n} = \frac{1}{1 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 3900} = 1{,}6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_а N_д}{n^2_i} =$$

$$= 0{,}0258 \ln \frac{1{,}65 \cdot 10^{15} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{15}}{(2{,}5 \cdot 10^{13})^2} = 0{,}215 \approx 0{,}22 \text{ В}.$$

7.4. Решить предыдущую задачу для кремниевого диода с такими же значениями удельных сопротивлений p- и n-областей.

7.5. Для кремниевого диода с резким p-n-переходом начертить в полулогарифмическом масштабе распределение концентрации носителей заряда в переходе, если $N_д = 10^{15}$ см$^{-3}$, а $N_а = 10^{16}$ см$^{-3}$. Определить численные значения ординат, указать n- и p-области, а также область, обедненную носителями заряда. Для этих условий начертить также распределение плотности объемного заряда и потенциала в переходе.

7.6. Выполнить такие же построения, как в предыдущей задаче, для германиевого диода с резким p-n-переходом и такими же концентрациями примесей.

7.7. В германиевом p-n-переходе удельная проводимость p-области $\sigma_p = 10^4$ См/м и удельная проводимость n-области $\sigma_n = 10^2$ См/м. Подвижности электронов μ_n и дырок μ_p в германии соответственно равны 0,39 и 0,19 м^2/(В·с). Концентрация собственных носителей в германии при $T = 300$ К $n_i = 2{,}5 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при $T = 300$ К.

Решение. Для материала p-типа $\sigma_p \approx p_p e \mu_p$, где σ_p — удельная проводимость; μ_p — подвижность дырок; p_p — концентрация дырок; e — заряд электрона. Отсюда

$$p_p = \sigma_p / (e\mu_p) = 10^4 / (0{,}19 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}) = 3{,}29 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Аналогично для материала n-типа

$$n_n = \sigma_n / (e\mu_n) = 100 / (0{,}39 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}) =$$
$$= 1{,}60 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрация

$$p_n = n^2_i / n_n = (2{,}5 \cdot 10^{19})^2 / (1{,}60 \cdot 10^{21}) = 3{,}91 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_к = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{3{,}29 \cdot 10^{23}}{3{,}91 \cdot 10^{17}}\right) = 0{,}35 \text{ В}.$$

7.8. Используя данные и результаты предыдущей задачи, найти: а) плотность обратного тока насыщения, а также отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной, если диффузионная длина электронов и дырок $L_n = L_p = 1 \cdot 10^{-3}$ м; б) напряжение, при котором плотность прямого тока $j = 10^5$ А/м^2.

Решение. а) Плотность обратного тока насыщения

$$j_0 = D_p e p_n / L_p + D_n e n_p / L_n.$$

Из предыдущей задачи

$$p_n = 3{,}91 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}; \quad n_p = n^2_i / p_p = 1{,}9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Известно, что

$$D_p = (kT/e)\mu_p \quad \text{и} \quad D_n = (kT/e)\mu_n.$$

Следовательно,

$$j_0 = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \left[\frac{(3{,}91 \cdot 10^{17} \cdot 0{,}19 + 1{,}9 \cdot 10^{15} \cdot 0{,}39)}{1 \cdot 10^{-3}}\right] = 0{,}31 \text{ А/м}^2.$$

Отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной

$$I_{0p} / I_{0n} = \mu_p p_n L_n / (\mu_n n_p L_p) =$$
$$= 0{,}19 \cdot 3{,}91 \cdot 10^{17} / (0{,}39 \cdot 1{,}9 \cdot 10^{15}) = 100.$$

б) Напряжение, которое необходимо приложить к p-n-переходу для получения тока плотностью 10^5 А/м^2, найдем из выражения

$$j = j_0 (e^{eU/(kT)} - 1).$$

При этом

$$e^{eU/(kT)} - 1 = 10^5 / 0{,}31 = 3{,}2 \cdot 10^5; \quad eU/(kT) = 12{,}7,$$

откуда

$$U = \frac{12{,}7 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}602 \cdot 10^{-19}} = 0{,}328 \approx 0{,}33 \text{ В}.$$

7.9. В кремниевом p-n-переходе удельное сопротивление p-области $\rho_p = 10^{-4}$ Ом·м, а удельное сопротивление n-области $\rho_n = 10^{-2}$ Ом·м. Вычислить контактную разность потенциалов $\varphi_к$, если подвижности дырок μ_p и электронов

μ_n соответственно равны 0,05 и 0,13 м²/(В·с), а собственная концентрация $n_i=1{,}38\cdot10^{16}$ м⁻³ при $T=300$ К.

7.10. У германиевого диода *p-n*-переход имеет площадь поперечного сечения $П=10^{-6}$ м². Расстояние от металлургической границы до каждого омического контакта 0,1 мм. Удельное сопротивление *p*-области $\rho_p=4{,}2\cdot10^{-4}$ Ом·м и время жизни неосновных носителей заряда в *p*-области $\tau_n=75$ мкс, а удельное сопротивление *n*-области $\rho_n=2{,}08\times\times10^{-2}$ Ом·м и время жизни $\tau_p=150$ мкс.

Определить обратный ток насыщения диода, если подвижность электронов $\mu_n=0{,}30$ м²/(В·с), подвижность дырок $\mu_p=0{,}15$ м²/(В·с), концентрация собственных носителей заряда $n_i=2{,}5\cdot10^{19}$ м⁻³ при $T=300$ К.

7.11. *p-n*-переход выполнен из собственного германия с концентрацией $n_i=10^{13}$ см⁻³, легированного акцепторной примесью с концентрацией $N_а=10^{17}$ см⁻³ и донорной примесью с концентрацией $N_д=5\cdot10^{16}$ см⁻³. Коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок соответственно равны 100 и 50 см²/с, диффузионная длина $L_n=L_p=0{,}8$ см. Определить: а) контактную разность потенциалов $\varphi_к$; б) плотность обратного тока насыщения j_0 при $T=300$ К.

7.12. В германиевом *p-n*-переходе удельные сопротивления областей равны: $\rho_p=4{,}2\cdot10^{-4}$ Ом·м и $\rho_n=2{,}08\times\times10^{-2}$ Ом·м. Подвижность электронов $\mu_n=0{,}3$ м²/(В·с) и дырок $\mu_p=0{,}15$ м²/(В·с), концентрация собственных носителей заряда равна $n_i=2{,}5\cdot10^{19}$ м⁻³. Время жизни неосновных носителей заряда $\tau_n=75$ мкс и $\tau_p=150$ мкс. Площадь поперечного сечения *p-n*-перехода $П=10^{-6}$ м². ($T=300$ К).

Определить: а) контактную разность потенциалов $\varphi_к$; б) обратный ток насыщения; в) долю тока, создаваемую дырками.

7.13. Для германиевого *p-n*-перехода предыдущей задачи вычислить: а) концентрацию дырок на границе обедненного носителями заряда слоя и материала *n*-типа, если на переход подаются прямые и обратные напряжения 25, 50 и 100 мВ; б) прямое напряжение, при котором концентрация инжектированных дырок составляет 10% равновесной концентрации электронов; в) удельную проводимость на границе обедненного носителями заряда слоя в этом случае.

7.14. Кремниевый планарный *p-n*-переход имеет удельную проводимость *p*-области $\sigma_p=10^3$ См/м и *n*-области $\sigma_n=20$ См/м. Время жизни неосновных носителей заряда 5 и 1 мкс в *p*- и *n*-областях соответственно. Определить: а) отношение дырочной составляющей тока к электронной в *p-n*-переходе; б) плотность обратного тока насыщения и

плотность тока, текущего через p-n-переход при прямом напряжении, равном 0,3 В. Температура T=300 К, концентрация собственных носителей заряда $n_i=1{,}4\cdot10^{16}$ м$^{-3}$, подвижность электронов μ_n=0,12 м^2/(В·с), подвижность дырок μ_p=0,05 м^2/(В·с).

7.15. Резкий кремниевый p-n-переход сформирован из материала p-типа с удельным сопротивлением $\rho_p=1{,}3\times\times10^{-3}$ Ом·м и материала n-типа с удельным сопротивлением $\rho_n=4{,}6\cdot10^{-3}$ Ом·м при T=300 К. Время жизни неосновных носителей заряда в материале p- и n-типа 100 и 150 мкс соответственно, площадь p-n-перехода $П$=1 мм^2. Вычислить обратный ток насыщения, предположив, что протяженность p- и n-областей много больше диффузионной длины, если $\mu_p=4{,}8\cdot10^{-2}$ м^2/(В·с), μ_n=0,135 м^2/(В·с), $n_i=6{,}5\cdot10^{16}$ м$^{-3}$. Чему будет равен обратный ток насыщения, если в таком же p-n-переходе создать p- и n-области длиной 50 мкм каждая?

7.16. Исходя из уравнения

$$I_{p\text{-}n(x)}=\left(\frac{ПeD_p p_{n(0)}}{L_p}\right)e^{-x/L_p}$$

для $I_{p\text{-}n}$ и соответствующего уравнения для $I_{n\text{-}p}$, доказать, что отношение дырочной составляющей тока к электронной в p-n-переходе

$$\frac{I_{p\text{-}n(0)}}{I_{n\text{-}p(0)}}=\frac{\sigma_p L_n}{\sigma_n L_p},$$

где σ_p и σ_n — удельные проводимости p- и n-областей.

7.17. Исходя из уравнения для обратного тока насыщения

$$I_0=\frac{ПeD_p p_n}{L_p}+\frac{ПeD_n n_p}{L_n},$$

показать, что обратный ток насыщения p-n-перехода можно найти по формуле

$$I_0=П\frac{kT}{e}\frac{b\sigma^2_i}{(1+b)^2}\left(\frac{1}{\sigma_n L_p}+\frac{1}{\sigma_p L_n}\right),$$

где $П$ — площадь электронно-дырочного перехода; σ_i — собственная удельная проводимость полупроводника; σ_p (σ_n) — удельная проводимость p(n)-области; L_n — диффузионная длина электронов в p-области; L_p — диффузионная длина дырок в n-области; $b=\mu_n/\mu_p$; k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; T — температура.

7.18. Используя результат задачи 7.17, найти обратный ток насыщения для германиевого сплавного p-n-перехода

при $T=300$ К, если площадь его поперечного сечения $П=4$ мм^2, $\sigma_p=1$ См/см, $\sigma_n=0{,}1$ См/см, $L_n=L_p=0{,}15$ см.

7.19. Ток, текущий в идеальном p-n-переходе при большом обратном напряжении и $T=300$ К, равен $2\cdot10^{-7}$ А. Найти ток, текущий при прямом напряжении, равном 0,1 В.

7.20. Вычислить прямое напряжение на p-n-переходе при токе диода 1 мА, если обратный ток насыщения I_0 при $T=300$ К равен: а) 1 мкА; б) 1 нА.

7.21. Германиевый сплавной p-n-переход имеет обратный ток насыщения $I_0=1$ мкА, а кремниевый с такими же размерами — $I_0=10^{-8}$ А. Вычислите и сравните прямые напряжения на переходах при $T=293$ К, если через каждый диод протекает ток 100 мА.

Решение. Ток диода определим по формуле

$$I=I_0(e^{eU/(kT)}-1),$$

где I_0 — обратный ток насыщения.

Для германиевого p-n-перехода

$$100\cdot10^{-3}=10^{-6}\,e^{1{,}602\cdot10^{-19}U/(1{,}38\cdot10^{-23}\cdot293)},$$

откуда $U=288$ мВ.

Аналогично для кремниевого p-n-перехода при $I_0=10^{-8}$ А $U=407$ мВ.

7.22. Кремниевый p-n-переход имеет следующие данные: ширина p-n-перехода $\Delta=10^{-3}$ см, концентрация акцепторных примесей $N_а=10^{19}$ см$^{-3}$, концентрация донорных примесей $N_д=2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$, площадь поперечного сечения перехода $П=10^{-4}$ см^2, длина областей $l_n=10^{-4}$ см, $l_p=10^{-3}$ см, коэффициенты диффузии неосновных носителей $D_p=8$ см^2/с, $D_n=25$ см^2/с, концентрация собственных носителей заряда $n_i=1{,}5\cdot10^{10}$ см$^{-3}$. Определить: а) обратный ток насыщения I_0; б) прямой ток и падение напряжения на объемах p- и n-областей при прямом напряжении, равном 0,65 В.

Решение. а) Поскольку $N_а\gg N_д$, то обратный ток насыщения определим из выражения

$$I_0=\frac{eПn_i^2D_n}{\Delta N_д}=$$

$$=\frac{1{,}602\cdot10^{-19}\cdot10^{-4}(1{,}5)^2\cdot10^{20}\cdot25}{10^{-3}\cdot2\cdot10^{16}}=4{,}5\cdot10^{-15}\text{ А}.$$

б) Для прямого напряжения, равного 0,65 В, ток

$$I\approx I_0e^{eU/(kT)}=4{,}5\cdot10^{-15}e^{0{,}65\cdot1{,}602\cdot10^{-19}/(1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300)}=4\cdot10^{-4}\text{ А}.$$

Сопротивления объемов p- и n-областей определяем по формуле

$$R=\rho l/П,$$

где ρ — удельное сопротивление; l — длина областей; $П$ — площадь p-n-перехода.

Удельные сопротивления можно вычислить по формулам:

для n-области

$$n \gg p \text{ и } \rho_n=1/(e\mu_n n)=3\cdot 10^{-1} \text{ Ом}\cdot\text{см}.$$

Следовательно, сопротивление n-области

$$R=\frac{3\cdot 10^{-1}\cdot 10^{-1}}{10^{-4}}=3\cdot 10^{-1} \text{ Ом};$$

для p-области

$$p \gg n \text{ и } \rho_p=1/(e\mu_p p)=2\cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}.$$

Следовательно, сопротивление p-области

$$R=2\cdot 10^{-3}\cdot 10^{-3}/10^{-4}=2\cdot 10^{-2}.$$

При токе, равном $4\cdot 10^{-4}$ А, падение напряжения на сопротивлениях объемов p- и n-областей равно $1{,}3\cdot 10^{-4}$ В.

7.23. Рассчитать и построить вольт-амперную характеристику идеального полупроводникового диода при $T=300$ К, если обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА. Расчет провести в интервале напряжений от 0 до —10 В (через 1 В) и от 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

7.24. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, рассчитать и построить вольт-амперную характеристику диода, предположив, что диод имеет омическое сопротивление p- и n-областей, равное 25 Ом. Характеристику построить на графике, вычерченном для задачи 7.23.

7.25. Диод имеет обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА, напряжение, приложенное к диоду, равно 0,5 В. Пользуясь упрощенным уравнением вольт-амперной характеристики диода, найти отношение прямого тока к обратному при $T=300$ К.

7.26. Удельная проводимость p-области полупроводникового диода $\sigma_p=100$ См/см, удельная проводимость n-области $\sigma_n=1$ См/см, площадь поперечного сечения $П=0{,}5\times 1$ мм^2, длина диода 2 мм, переход находится посередине. Обратный ток насыщения $I_0=5$ мкА, $T=300$ К. Вычислить напряжения, при которых ток диода будет равен 1 и 10 мА. Уточнить результаты с учетом падения напряжения на объемных сопротивлениях p- и n-областей. Изменением со-

противлений объемов при увеличении уровня инжекции пренебречь.

7.27. Резкий германиевый p-n-переход имеет площадь поперечного сечения $П=1$ мм^2. Область p сильно легирована, так что ее удельная проводимость в несколько раз больше удельной проводимости n-области. Удельное сопротивление n-области равно 5 Ом·см, а время жизни носителей заряда $\tau_p=50$ мкс. Определить: а) обратный ток насыщения I_0; б) прямое напряжение, при котором ток равен 1 мА.

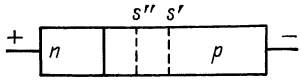


Рис. 7.1.

7.28. Определить контактную разность потенциалов $\varphi_к$ кремниевого p-n-перехода при $T=300$ К, если $N_а=2\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ и $N_д=5\cdot10^{12}$ см$^{-3}$.

7.29. В небольшом прямоугольном стержне из германия имеется плоский p-n-переход около одного конца, как показано на рис. 7.1. Переход смещен в обратном направлении, и результирующий ток равен 1 мкА. Световой луч, параллельный переходу, сфокусирован на поверхности стержня в области s', и это вызывает увеличение тока до 54 мкА. Когда световой луч сдвигается на расстояние $6\times\times10^{-4}$ м к переходу в область s'', ток увеличивается до 107 мкА. Температура стержня постоянная и равна 300 К. Чему равно среднее время жизни электронов τ_n в p-области стержня, если подвижность электронов в германии $\mu_n=$ $=0{,}38$ м^2/(В·с)?

7.30. Германиевый полупроводниковый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0=25$ мкА, работает при прямом напряжении, равном 0,1 В, и $T=300$ К. Определить: а) сопротивление диода постоянному току R_0; б) дифференциальное сопротивление $r_{диф}$.

Решение. Найдем ток диода при прямом напряжении $U=0{,}1$ В по формуле

$$I=I_0(e^{eU/(kT)}-1)=25\cdot10^{-6}(e^{1{,}602\cdot10^{-19}\cdot0{,}1/(1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300)}-1)=$$
$$=25\cdot10^{-6}(e^{3{,}87}-1)=1{,}17\ \text{мА}.$$

Тогда сопротивление диода постоянному току

$$R_0=U/I=0{,}1/(1{,}17\cdot10^{-3})=85\ \text{Ом}.$$

Вычислим дифференциальное сопротивление

$$r_{диф}^{-1}=\frac{dI}{dU}=I_0\left(\frac{e}{kT}\right)e^{eU/(kT)}=25\cdot10^{-6}(38{,}6)\cdot48=46\cdot10^{-3}\ \text{См},$$

откуда

$$r_{диф} = 1/(46 \cdot 10^{-3}) = 21{,}6 \text{ Ом},$$

или приближенно, с учетом того, что $I \gg I_0$,

$$r_{диф}^{-1} = \frac{dI}{dU} = \left(\frac{e}{kT}\right)(I + I_0) \approx \frac{e}{kT} I,$$

откуда

$$r_{диф} \approx \frac{kT}{eI} = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}17 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ Ом}.$$

7.31. К несимметричному p-n-переходу с $N_д \gg N_а$ приложено обратное напряжение. Указать составляющую тока в переходе, которая будет наибольшей при этих условиях.

7.32. Какая область диода (n или p) обладает более высоким удельным сопротивлением, если известно, что число дырок, инжектируемых через p-n-переход в единицу времени, на несколько порядков превышает число электронов?

7.33. С повышением температуры число пустых «ловушек» в полупроводнике уменьшается. Как при этом изменяется время жизни τ избыточных носителей заряда?

7.34. Определить концентрацию акцепторных примесей $N_а$ в p-области и концентрацию донорных примесей $N_д$ в n-области германиевого диода, если известно, что при T=300 К удельные проводимости областей равны: σ_n= =1 См/см; σ_p=100 См/см.

7.35. Физические свойства какой из областей полупроводника (n или p) определяют значение дырочного диффузионного тока при постоянных напряжении и температуре?

7.36. Можно ли измерить высоту потенциального барьера, образующегося при контакте двух полупроводников с различным типом электропроводности, с помощью вольтметра? Объясните.

7.37. В идеальном p-n-переходе прямое напряжение 0,1 В вызывает определенный ток носителей заряда при T=300 К. Какое необходимо прямое напряжение, чтобы ток увеличился в 2 раза?

7.38. Имеется идеальный p-n-переход при T=300 К. Определить: а) какое необходимо приложить напряжение к переходу, чтобы получить прямой ток, равный обратному току насыщения I_0; б) какое необходимо прямое напряжение для получения тока, в 100 раз большего обратного тока насыщения I_0.

7.39. Объясните, как будет влиять на обратный ток насыщения германиевого диода добавление примеси. Рассмотрите два случая: а) концентрации примесей увеличиваются в обеих областях; б) концентрация примеси увеличивается только в одной из областей.

7.40. Для идеального *p-n*-перехода определить: а) при каком напряжении обратный ток будет достигать 90% значения обратного тока насыщения при $T=300$ К; б) отношение тока при прямом напряжении, равном 0,05 В, к току при том же значении обратного напряжения.

Решение. а) Известно, что при $T=300$ К температурный потенциал

$$U_T=T/11\,600\approx 0{,}026 \text{ В}.$$

Ток диода

$$I=I_0(e^{U/U_T}-1).$$

По условию задачи

$$0{,}9I_0=I_0(e^{U/0{,}026}-1),$$

откуда $U=(0{,}026)(-2{,}3)=-0{,}06$ В.

б) Определим отношение прямого тока к обратному при напряжениях 0,05 и —0,05 В:

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}}=\frac{I_0(e^{50/26}-1)}{I_0(e^{-50/26}-1)}=\frac{e^{1,92}-1}{e^{-1,92}-1}=\frac{6{,}82-1}{0{,}147-1}\approx 7.$$

7.41. При прямом напряжении U уравнение для тока полупроводникового диода $I=I_0(e^{eU/(kT)}-1)$ принимает вид $I\approx I_0e^{eU/(kT)}$. Показать, что в этом случае активная проводимость диода переменному току пропорциональна значению тока.

7.42. Германиевый *p-n*-переход с площадью $П=1$ мм² имеет обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА при $T=300$ К. Полагая, что ток обусловлен только электронами, вычислить диффузионную длину электронов L_n в *p*-области. Уровень Ферми в *p*-области лежит на 0,5 эВ ниже дна зоны проводимости, подвижность электронов $\mu_n=3900$ см²/(В·с)

7.43. Обратный ток насыщения полупроводникового диода $I_0=1$ мкА при $T=27$ °С и $I=10$ мкА при $T=65$ °С. Построить вольт-амперные характеристики этого диода при температурах, равных 27 и 65°С, при изменении напряжения от —2 до 0,5 В.

7.44. При $T=300$ К обратный ток насыщения идеального германиевого диода $I_0=30$ мкА. Найти дифференциальное сопротивление диода при прямом и обратном напряжениях, равных 0,2 В.

7.45. Идеальный кремниевый p-n-переход имеет обратный ток насыщения $I_0=30$ мкА при $T=125$°С. Определить дифференциальное сопротивление диода при прямом и обратном напряжениях, равных 0,2 В.

7.46. В некотором идеальном p-n-переходе обратный ток насыщения $I_0=10^{-14}$ А при $T=300$ К и $I_0=10^{-9}$ А при $T=125$ °С. Определить напряжения на p-n-переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА.

Решение. Из уравнения вольт-амперной характеристики перехода $I=I_0(e^{eU/(kT)}-1)$ имеем

$$I/I_0+1=e^{eU/(kT)}.$$

Логарифмируя и решая это уравнение относительно U, получаем

$$U=\frac{kT}{e}\ln\left(\frac{I}{I_0}+1\right).$$

При $T=300$ К

$$U=0{,}026\ln(10^{-3}/10^{-14}+1)=0{,}026\cdot 25{,}3=0{,}66\text{ В}.$$

При $T=125$ °С

$$U=0{,}036\ln(10^{-3}/10^{-9}+1)=0{,}5\text{ В}.$$

Такая температурная зависимость характерна для кремниевых диодов.

7.47. Определить, во сколько раз увеличивается обратный ток насыщения сплавного p-n-перехода диода, если температура увеличивается: а) от 20 до 80 °С для германиевого диода; б) от 20 до 150 °С для кремниевого диода.

Решение. Зависимость обратного тока насыщения от температуры выражается следующим уравнением:

$$I_0=kT^m e^{-U_{g0}/(\eta U_T)},$$

где k — постоянная; $E_{g0}=eU_{g0}$ — ширина запрещенной зоны при $T=0$ К; $U_T=kT/e$ — температурный потенциал.

Известно, что для германия $\eta=1$, $m=2$, $U_{g0}=0{,}785$ В; для кремния $\eta=2$, $m=1{,}5$, $U_{g0}=1{,}21$ В.

Следовательно, для германия обратный ток насыщения

$$I_0=kT^2e^{-0{,}785/U_T}.$$

При $T=80$ °С, или $T=353$ К, имеем:

$$U_T=353/11\,600=0{,}0304\text{ В}.$$

Таким образом,

$$I_{0(T=80^\circ C)} = k(353)^2 e^{-0,785/0,0304}.$$

При $T=20\,^\circ C$, или $T=293$ К,

$$U_T = 293/11\,600 = 0,0253 \text{ В}.$$

Тогда

$$I_{0(T=20^\circ C)} = k(293)^2 e^{-0,785/0,0253}.$$

Следовательно,

$$\frac{I_{0(T=80^\circ C)}}{I_{0(T=20^\circ C)}} = \frac{k(353)^2 e^{-0,785/0,0304}}{k(293)^2 e^{-0,785/0,0253}} = \frac{(353)^2 e^{-25,8}}{(293)^2 e^{-31}} = 263.$$

Для кремниевого диода

$$I_0 = kT^{1,5} e^{-1,21/(2U_T)}.$$

При $T=150\,^\circ C$, или $T=423$ К, температурный потенциал

$$U_T = 423/11\,600 = 0,0364 \text{ В};$$

тогда

$$I_{0(T=150^\circ C)} = k(423)^{1,5} e^{-1,21/(2\cdot 0,0364)},$$

При температуре $T=20\,^\circ C$, или $T=293$ К,

$$U_T = 293/11\,600 = 0,0253 \text{ В};$$

$$I_{0(T=20^\circ C)} = k(293)^{1,5} e^{-1,21/(2\cdot 0,025)}.$$

Отношение токов

$$\frac{I_{0(T=150^\circ C)}}{I_{0(T=20^\circ C)}} = \frac{(423)^{1,5} e^{-16,6}}{(293)^{1,5} e^{-23,9}} = 2568.$$

7.48. Покажите, что емкость обедненного носителями заряда слоя резкого *p-n*-перехода может быть вычислена по формуле

$$C = k/\sqrt{U + \varphi_к},$$

где k — постоянный коэффициент; U — обратное напряжение; $\varphi_к$ — контактная разность потенциалов.

Было обнаружено, что если к такому *p-n*-переходу приложить переменное напряжение с амплитудой 0,5 В, то максимальная емкость перехода будет равна 2 пФ. Определить контактную разность потенциалов и минимальное значение емкости, если емкость перехода при нулевом смещении равна 1 пФ.

7.49. Барьерная емкость диода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряже-

ние, чтобы уменьшить емкость до 50 пФ, если контактная разность потенциалов $\varphi_к=0{,}82$ В?

Решение. Барьерная емкость резкого p-n-перехода, Ф/м^2, определяется по формуле

$$C_б=\left[\frac{\varepsilon e N_а N_д}{2(N_а+N_д)}\right]^{1/2} U^{-1/2},$$

где U — напряжение на p-n-переходе; $N_а$ и $N_д$ — концентрации примесей на каждой из сторон p-n-перехода.

Следовательно, для данного диода

$$C_б=k/(U+\varphi_к)^{1/2},$$

где k — некоторая постоянная; $U_{обр}$ — обратное напряжение; $\varphi_к$ — контактная разность потенциалов.

При $U_{обр}=2$ В $C_б=200$ пФ,

тогда

$$k=200\cdot10^{-12}(2+0{,}82)^{1/2}=3{,}35\cdot10^{-10}\ пФ\cdot В^{1/2}.$$

Находим теперь обратное напряжение, при котором $C_б=$ $=50$ пФ:

$$50\cdot10^{-12}=\frac{3{,}35\cdot10^{-10}}{(U_{обр}+0{,}82)^{1/2}},$$

откуда $U_{обр}=44{,}1$ В.

7.50. Вычислить барьерную емкость германиевого полупроводникового диода с площадью поперечного сечения p-n-перехода $П=1$ мм^2 и шириной области, обедненной носителями заряда (шириной запирающего слоя), $2\times$ $\times10^{-4}$ см. Относительная диэлектрическая проницаемость германия равна 16.

7.51. Доказать, что для сплавного p-n-перехода при $N_а\ll N_д$ ширина запирающего слоя (области, обедненной носителями заряда) может быть определена по формуле

$$\Delta=(2\varepsilon\mu_p\varphi_к)^{1/2}/\sigma_p^{1/2},$$

где $\varphi_к$ — контактная разность потенциалов.

7.52. Найти барьерную емкость германиевого p-n-перехода, если удельное сопротивление p-области $\rho_p=3{,}5$ Ом$\times$ $\times$см, контактная разность потенциалов $\varphi_к=0{,}35$ В, приложенное обратное напряжение $U_{обр}=5$ В и площадь поперечного сечения p-n-перехода $П=1$ мм^2.

7.53. Удельная проводимость p-области образца германия с резким p-n-переходом $\sigma_p=10^2$ См/см, а удельная проводимость n-области $\sigma_n=1$ См/см. Относительная диэлектрическая проницаемость образца $\varepsilon=16$. В равновесном состоянии высота потенциального барьера $\varphi_к=0{,}358$ В.

Найти: а) барьерную емкость $C_б$ перехода, имеющего площадь поперечного сечения $П=0{,}5$ мм^2; б) барьерную емкость $C_б$ перехода при обратных напряжениях, $U_{обр}=5$ и 10 В.

7.54. В равновесном состоянии высота потенциального барьера сплавного германиевого p-n-перехода равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей N_a в p-области много меньше концентрации доноров $N_д$ в n-области и равна $3\cdot10^{14}$ см$^{-3}$. Требуется: а) вычислить ширину p-n-перехода для обратных напряжений, равных 0,1 и 10 В; б) для прямого напряжения 0,1 В; в) найти барьерную емкость $C_б$, соответствующую обратным напряжениям, равным 0,1 и 10 В, если площадь p-n-перехода $П=1$ мм^2.

7.55. Прямой ток кремниевого диода $I=1$ мА. Чему равна диффузионная длина L инжектированных носителей заряда, если диффузионная емкость $C_{диф}=1$ мкФ. Считать, что концентрация примеси в p-области много больше концентрации примеси в n-области, уровень инжекции мал и толщина базы существенно больше диффузионной длины носителей заряда.

7.56. Имеется планарный p-n-переход, выполненный из кремния с $\rho_n=5$ Ом·см, $\tau_p=1$ мкс в n-области и с $\rho_p=0{,}1$ Ом·см и $\tau_n=5$ мкс в p-области. Найти: а) отношение дырочной составляющей тока к электронной; б) плотность тока, протекающего через переход при прямом напряжении, равном 0,3 В.

7.57. Идеальный резкий p-n-переход имеет следующие данные.

Концентрация акцепторной примеси в p-области $N_а=10^{24}$ м$^{-3}$, концентрация донорной примеси в n-области $N_д=10^{22}$ м$^{-3}$. Площадь поперечного сечения p-n-перехода $П=10^{-6}$ м^2. Подвижность дырок $\mu_p=0{,}2$ м^2/(В·с), подвижность электронов $\mu_n=0{,}4$ м^2/(В·с), диффузионные длины неосновных носителей заряда равны $L_p=2\cdot10^{-4}$ м, $L_n=3\cdot10^{-4}$ м, относительная диэлектрическая проницаемость образца $\varepsilon=16$, концентрация собственных носителей заряда $n_i=10^{19}$ м$^{-3}$. Вычислите при $T=300$ К значения следующих величин: а) концентрацию основных и неосновных носителей заряда; б) удельные проводимости p- и n-областей; в) контактную разность потенциалов $\varphi_к$; г) коэффициенты диффузии для носителей заряда обоих типов; д) обратный ток насыщения диода I_0; е) ток диода при прямом напряжении 0,25 В; ж) ток диода при большом обратном напряжении; з) ширину p-n-перехода при обратном напряжении 10 В; и) барьерную емкость p-n-перехода при обратном

напряжении 10 В; к) отношение дырочной составляющей тока, проходящего через p-n-переход, к электронной.

7.58. Резкий кремниевый p-n-переход состоит из области p-типа с концентрацией акцепторной примеси $N_а=3\times\times10^{23}$ м$^{-3}$ и n-области с концентрацией донорной примеси $N_д=3\cdot10^{22}$ м$^{-3}$. Площадь p-n-перехода $П=1$ мм^2, обратное напряжение $U_{обр}=10$ В. Определить: а) ширину p-n-перехода; б) максимальную напряженность электрического поля E внутри обедненного носителями заряда слоя; в) барьерную емкость $C_б$; г) напряжение на p-n-переходе, при котором произойдет электрический пробой, если для наступления пробоя требуется напряженность электрического поля $E=5\cdot10^7$ В/м.

7.59. Кремниевый p-n-переход формируется путем диффузии бора в кремний n-типа с удельным сопротивлением 0,015 Ом·м. Концентрация бора на поверхности равна $5\cdot10^{25}$ м$^{-3}$. Известно, что на глубине 1,5 мкм от поверхности концентрация бора уменьшается в e раз. Площадь поперечного сечения p-n-перехода $П=1$ мм^2, обратное напряжение $U=10$ В. Определить: а) ширину p-n-перехода; б) максимальную напряженность электрического поля в p-n-переходе; в) барьерную емкость p-n-перехода; г) напряжение пробоя, предполагая, что он наступает при напряженности электрического поля $E=5\cdot10^7$ В/м.

7.60. В кремниевом резком p-n-переходе с концентрациями примесей $N_а=10^{20}$ м$^{-3}$ и $N_д=10^{22}$ м$^{-3}$ лавинный пробой наступает при напряженности электрического поля $6\cdot10^7$ В/м. Вычислить ширину p-n-перехода и значение обратного напряжения, необходимое для начала возникновения пробоя. Относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon=12$.

7.61. Кремниевый сплавной p-n-переход имеет площадь поперечного сечения $П=1$ мм^2 и барьерную емкость $C_б=$ $=300$ пФ, если подводится обратное напряжение $U=10$ В. Найти: а) изменение емкости, если обратное напряжение становится равным 20 В; б) максимальную напряженность электрического поля в обедненном носителями заряда слое при обратном напряжении, равном 10 В. Относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon=12$.

7.62. Обратный ток насыщения полупроводникового диода $I_0=1$ мкА при $T=300$ К. Определить сопротивление диода постоянному току при прямом напряжении, равном 150 мВ.

7.63. Полупроводниковый диод имеет прямой ток 0,8 А при прямом напряжении 0,3 В и температуре окружающей среды $T=35$ °С. Определить: а) обратный ток насыщения;

б) дифференциальное сопротивление диода при прямом напряжении 0,2 В; в) дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 1 В.

7.64. Определить сопротивление диода постоянному току при прямом и обратном напряжениях, если при прямом напряжении 1 В прямой ток равен 5 мА, а при обратном напряжении 100 В обратный ток равен 0,25 мА.

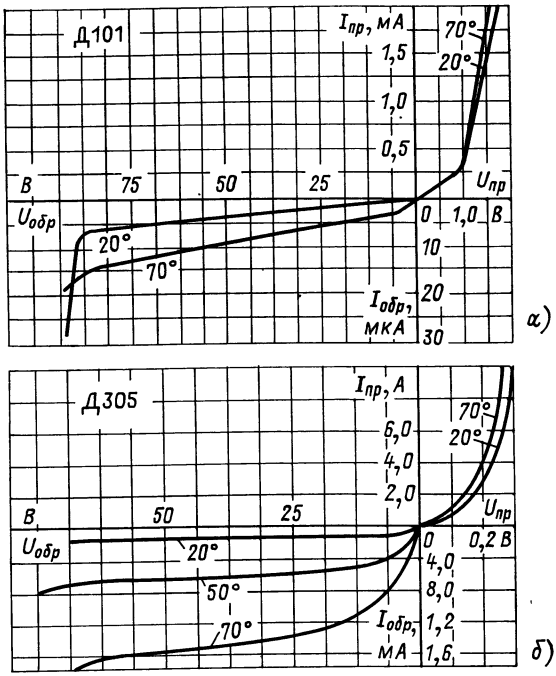


Рис. 7.2.

7.65. При изменении прямого напряжения на 0,1 В прямой ток германиевого диода изменяется на 10 мА, а при изменении обратного напряжения на 10 В обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном напряжениях.

7.66. Пользуясь вольт-амперной характеристикой диода Д101, изображенной на рис. 7.2,*а*, определить при T=20 и 70 °С: а) дифференциальные и сопротивления постоянному прямому току 500 мкА, 1 и 1,5 мА и постоянному обратному току при напряжении 50 В; в) мощности, рассеиваемые диодом при прохождении прямого тока 0,5 мА, и обратного тока при напряжении —50 В.

7.67. В детекторном каскаде, работающем в интервале температур от $T_1=20\,°C$ до $T_2=70\,°C$, используется полупроводниковый диод Д305, вольт-амперная характеристика которого изображена на рис. 7.2,*б*. Определить: а) сопротивление диода постоянному току R_0 и его дифференциальное сопротивление $r_{диф.пр}$ для $T_1=20\,°C$ при прямом напряжении 0,2 В и сопротивление постоянному току R_0 при обратном напряжении 25 В; б) во сколько раз изменится значение сопротивления диода постоянному току R_0 и его дифференциальное сопротивление $r_{диф.пр}$ при увеличении температуры от 20 до 70 °С.

7.68. Идеальный диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА, соединен последовательно с источником напряжения $E=10$ В и резистором с сопротивлением 1 кОм. Найти прямой ток и прямое напряжение на диоде, если диод работает при $T=300$ К.

7.69. Определить, во сколько раз изменится сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление полупроводникового диода Д305 (рис. 7.2,*б*): а) при изменении прямого напряжения от 0,4 до 0,6 В при неизменной температуре окружающей среды $T=20\,°C$; б) при изменении температуры окружающей среды T от 20 до 125 °С для напряжений $U=0{,}6$ и -50 В.

7.70. Определить диффузионную емкость и высоту потенциального барьера *p-n*-перехода германиевого диода, если концентрация дырок в *p*-области $p_p=10^{15}$ см$^{-3}$, концентрация электронов в *n*-области $n_n=10^{16}$ см$^{-3}$, температура $T=300$ К. Обратный ток насыщения $I_0=5$ мкА. Прямое напряжение $U_{пр}=0{,}2$ В. Время жизни носителей заряда $\tau=100$ мкс.

7.71. Определить диффузионную емкость $C_д$, сопротивление $r_{диф}$ *p-n*-перехода и объемное сопротивление R_s в эквивалентной схеме германиевого диода, работающего при $T=300$ К и напряжении $U=0{,}25$ В. Радиус *p-n*-перехода $r=0{,}06$ см, обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА, диффузионная длина электронов $L_n=0{,}1$ см, коэффициент диффузии электронов $D_n=93$ см^2/с, удельное сопротивление материала диода *p*- и *n*-областей $\rho=0{,}1$ Ом·см.

7.72. Определить основные параметры эквивалентной схемы (рис. 7.3) германиевого диода, если концентрация дырок в *p*-области $p_p=10^{15}$ см$^{-3}$, а концентрация электронов в *n*-области $n_n=10^{16}$ см$^{-3}$, обратный ток насыщения $I_0=5$ мкА, прямое напряжение $U_{пр}=0{,}2$ В, температура $T=300$ К, объемное сопротивление диода $R_s=10$ м, время жизни носителей заряда $\tau_p=10$ мкс.

7.73. Определить ширину p-n-перехода и барьерную емкость в германиевом диоде при T=300 К, если концентрация основных носителей $p_p=10^{16}$ см$^{-3}$, $n_n=10^{15}$ см$^{-3}$, относительная диэлектрическая проницаемость ε=16, площадь поперечного сечения p-n-перехода $П$=0,01 см^2, обратное напряжение равно 100 В.

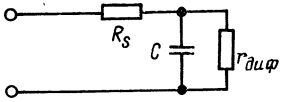


Рис. 7.3.

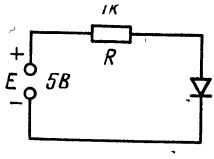


Рис. 7.4.

7.74. Определить полное сопротивление и диффузионную емкость эквивалентной схемы замещения германиевого диода (рис. 7.3), работающего при T=20 °С, если площадь поперечного сечения p-n-перехода $П$=0,01 см^2. Концентрация основных носителей заряда p-области $p_p=10^{17}$ см$^{-3}$, n-области $n_n=10^{16}$ см$^{-3}$, значение приложенного напряжения $U_{пр}$=0,25 В, коэффициенты диффузии D_n=93 см^2/с, D_p=44 см^2/с, диффузионные длины носителей заряда L_n=0,1 см, L_p=0,07 см, время жизни носителей заряда τ=10 мкс.

7.75. Обратный ток насыщения некоторого диода с барьером Шоттки равен 2 мкА. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения смещения E=0,2 В, так что на диод подается прямое напряжение. Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нем равно 0,1 В. Диод работает при T=300 К.

Решение. Определим ток диода

$$I=I_0(e^{eU/(kT)}-1),$$

где I_0 — обратный ток насыщения; U — прямое напряжение.

Поскольку падение напряжения на резисторе равно 0,1 В, то на диоде $U=E-U_R$=0,2—0,1=0,1 В. Поэтому ток диода

$$I=2\cdot10^{-6}\left(e^{\frac{1,6\cdot10^{-19}\cdot0,1}{1,38\cdot10^{-23}\cdot300}}-1\right)=93 \text{ мкА}.$$

Следовательно, $R=U/I$=0,1/(93·10^{-6})=1,08 кОм.

7.76. Определить ток идеального диода I, текущий в цепи, показанной на рис. 7.4, если E=5 В, R=1 кОм, обратный ток насыщения $I_0=10^{-12}$ А, температура T=300 К.

Решение. Задачу решим графо-аналитическим способом.

1. Используя значение $I_0=10^{-12}$ А и задаваясь напряжением диода, построим вначале вольт-амперную характеристику диода в соответствии с уравнением

$$I=I_0(e^{eU/(kT)}-1).$$

Вольт-амперная характеристика показана на рис. 7.5.

2. На том же графике построим нагрузочную прямую, используя уравнение

$$I=(E-U)/R.$$

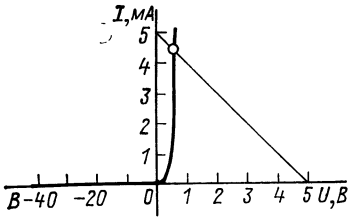


Рис. 7.5.

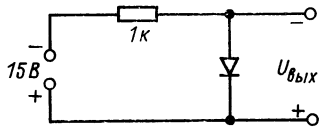


Рис. 7.6.

Точка пересечения нагрузочной прямой с вольт-амперной характеристикой и есть решение задачи. Из графика $I=4{,}5$ мА.

7.77. Идеальный диод включен в схему, изображенную на рис. 7.6. Определить выходное напряжение.

Решение. Поскольку на диод подано обратное напряжение, то можно предположить, что обратное сопротивление диода составляет несколько сотен килоом или даже больше. Следовательно, можно считать, что практически все напряжение падает на диоде, т. е. $U_{вых}=15$ В.

7.78. Определить выходное напряжение в схеме, изображенной на рис. 7.7, если при комнатной температуре используется кремниевый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0=10$ мкА.

Решение. Поскольку на диод подано прямое напряжение, то сопротивление кремниевых диодов будет примерно равно 200 Ом или меньше, и ток в схеме будет определяться в основном сопротивлением резистора $R_н=20$ кОм.

Следовательно, $I=40/(20\cdot10^3)=2$ мА. Подставив это значение в уравнение для тока полупроводникового диода и решив его относительно U, получим:

$$I=I_0(e^{eU/(kT)}-1);$$

$$2\cdot10^3=10\cdot10^{-6}(e^{eU/(kT)}-1);$$

$$e^x=201;\ x=eU/(kT)=5{,}30;\ kT/e\approx26\ \text{мВ}.$$

Следовательно, $U_{вых}=5{,}30\cdot 26$ мВ$=0{,}138$ В$\approx 0{,}14$ В.

7.79. Определить выходное переменное напряжение $U_{вых}$ схемы на рис. 7.8, если работа происходит при комнатной температуре.

Решение. Выходное переменное напряжение будет равно переменной составляющей напряжения на диоде. Положение рабочей точки определяется постоянной составляющей тока диода $I\approx 20/(10\cdot 10^3)=2$ мА. Прямое дифференциальное сопротивление диода находим по формуле $r_{диф.пр}=kT/(eI)=26\cdot 10^{-3}/(2\cdot 10^{-3})=13$ Ом. Поэтому $U_{вых}=$ $=3\cdot 13/(13+10\cdot 10^3)=3{,}9$ мВ.

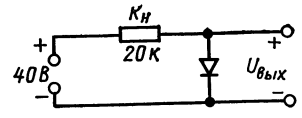


Рис. 7.7.

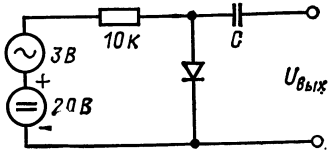


Рис. 7.8.

7.80. Резистор с сопротивлением 100 Ом соединен последовательно с германиевым диодом, обратный ток насыщения которого при $T=27°C$ равен 5 мкА. Начертите суммарную вольт-амперную характеристику этой комбинации в полулогарифмическом масштабе в интервале токов от 10 мкА до 50 мА при прямом напряжении.

7.81. Диод Д103 включен в схему, изображенную на рис. 7.9. Напряжение источника питания $E=2$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_н=1$ кОм. Требуется: определить ток диода, напряжение на диоде и на нагрузке; построить рабочую характеристику диода. Вольт-амперная характеристика диода изображена на рис. 7.10.

7.82. Пользуясь справочником, определить, во сколько раз уменьшается допустимое обратное напряжение полупроводникового диода Д302 при изменении температуры окружающей среды от 20 до 70 °С.

7.83. Пользуясь справочником, определить, можно ли использовать диод Д109 для выпрямления переменного синусоидального напряжения с амплитудой 85 В.

7.84. Пользуясь справочником, выбрать тип диода, пригодного для выпрямления переменного синусоидального напряжения с амплитудой $U_m=400$ В и рассчитанного на выпрямленный ток 250 мА.

7.85. Обратное напряжение через резистор R подается на диод Д103. Определить ток диода и напряжение на нем

при сопротивлениях резисторов, равных 10 МОм, 1 МОм и 100 кОм. Вольт-амперная характеристика диода изображена на рис. 7.10.

7.86. Дана цепь, изображенная на рис. 7.11,*а*. Определить значение и форму выходного напряжения U_2, предполагая, что диод представляет собой идеальный диод. Вольт-амперная характеристика диода и его эквивалентная схема изображены на рис. 7.11,*б* и *в* соответственно.

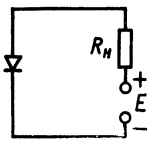


Рис. 7.9.

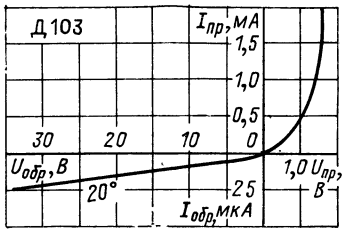


Рис. 7.10.

Решение. При положительной полуволне подводимого напряжения на диод подается прямое напряжение, при отрицательной — обратное. Представляя диод в качестве идеального диода, изобразим эквивалентные схемы цепи для положительной (рис. 7.12,*а*) и отрицательной (рис. 7.12,*б*) полуволн подводимого напряжения.

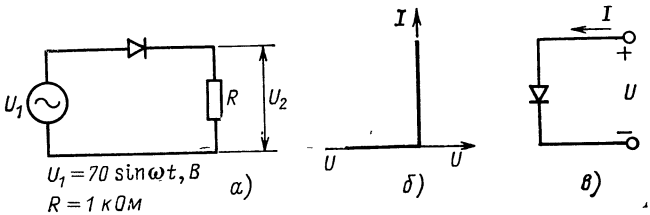


Рис. 7.11.

При положительном входном напряжении U_1 выходное напряжение $U_2 = U_1$; при отрицательном напряжении на диоде ток диода, а следовательно, ток и напряжение на резисторе равны 0. Графики входного и выходного напряжений показаны на рис. 7.13,*а* и *б*.

В действительности выходное напряжение должно быть несколько меньше (69 или 69,5 В), так как происходит падение напряжения на диоде. Поскольку это напряжение

мало, им можно пренебречь. Его следует учитывать при малых подводимых напряжениях. Если, например, $U_1 = +2$ В, то согласно схеме выходное напряжение тоже должно быть равно 2 В. В действительности выходное напряжение с учетом падения напряжения на диоде будет равно около 1,3 В (для кремниевого диода) или 1,7 В (для германиевого диода).

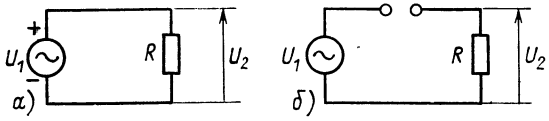


Рис. 7.12.

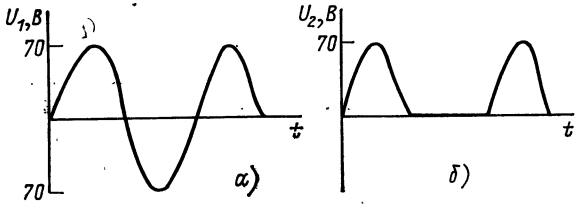


Рис. 7.13.

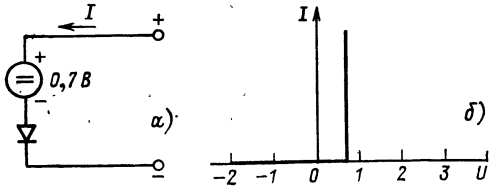


Рис. 7.14.

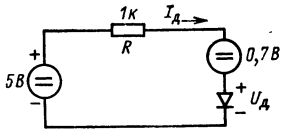


Рис. 7.15.

7.87. Представляя диод моделью для большого сигнала (рис. 7.14,*а*), имеющего вольт-амперную характеристику, представленную рис. 7.14,*б*, определить ток в цепи, показанной на рис. 7.4. Сравните с ответом, полученным при решении задачи 7.76. Диод кремниевый.

Решение. Эквивалентная схема содержит идеальный диод и последовательно с ним источник напряжения 0,7 В (для германия типичное значение напряжения источника 0,3 В, для арсенида галлия — 1 В). Цепь, изображенную на рис. 7.14, начертим, представив диод моделью для большого сигнала (рис. 7.15).

Падение напряжения в контуре равно:

$$-5+1000I_д+0{,}7+U_д=0.$$

Из рассмотрения схемы или из этого выражения следует, что на идеальном диоде и на резисторе должно падать напряжение 4,3 В. Поскольку согласно указанной полярности выпрямитель смещен в прямом направлении, то падение напряжения на нем отсутствует ($U_д=0$). Следовательно, напряжение 4,3 В должно падать только на резисторе. По закону Ома ток диода $I_д=4{,}3/10^3=$ $=4{,}3$ мА.

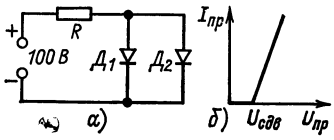


Рис. 7.16.

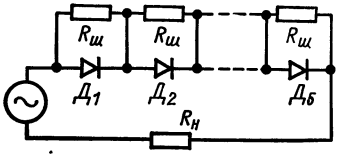


Рис. 7.17.

7.88. Найти токи диодов в схеме, изображенной на рис. 7.16,*а*, считая, что применена кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперных характеристик диодов (рис. 7.16,*б*). Для германиевого диода $Д_1$ напряжение сдвига $U_{сдв1}=0{,}2$ В, дифференциальное сопротивление $r_{диф1}=$ $=20$ Ом, для кремниевого диода $Д_2$ напряжение сдвига $U_{сдв1}=0{,}6$ В и дифференциальное сопротивление $r_{диф2}=$ $=15$ Ом. Расчет произвести для двух случаев: а) $R_н=$ $=10$ кОм; б) $R_н=1$ кОм.

7.89. Найдите коэффициент выпрямления и обратный ток насыщения идеального германиевого диода, работающего при $T=300$ К, если известно, что при прямом напряжении $U_{пр}=0{,}15$ В через диод протекает ток $I_{пр}=10$ мА.

7.90. Определить прямой ток и сопротивление постоянному току R_0 кремниевого диода при напряжении $U_{пр}=1$ В, если коэффициент выпрямления кремниевого диода $K_в=$ $=2500$, а обратный ток насыщения $I_0=20$ мкА при $U_{обр}=$ $=-1$ В.

7.91. Рассчитать простейшую схему без фильтра для выпрямления синусоидального напряжения с действующим значением $U=700$ В, используя диоды Д226Б.

Решение. Определим амплитудное значение синусоидального напряжения: $U_m=\sqrt{2}U=\sqrt{2}\cdot 700\approx 1000$ В. Это напряжение в простейшей схеме выпрямления будет обратным. Поскольку $U_{обр max}$ у диодов Д226Б при максимальной рабочей температуре составляет 300 В, то для выпрямления необходимо применить цепочку последовательно соединенных диодов. Но вследствие больших разбросов обратных сопротивлений диодов (обратные сопротивления

диодов одного и того же типа могут отличаться в несколько раз) диоды необходимо шунтировать резисторами.

Необходимое число диодов n определим по формуле $n=U_m/k_н U_{обр\,max}$, где $k_н$ — коэффициент нагрузки по напряжению (может принимать значения от 0,5 до 0,8). Пусть $k_н=0{,}7$, тогда $n=1000/(0{,}7\cdot 300)=4{,}76$.

Возьмем $n=5$.

Значения сопротивлений шунтирующих резисторов определим по формуле

$$R_ш \leqslant \frac{nU_{обр\,max}-1{,}1U_m}{(n-1)I_{обр\,max}},$$

где коэффициент 1,1 учитывает 10%-ный разброс сопротивлений применяемых резисторов; $I_{обр\,max}$ — обратный ток при максимально допустимой температуре.

Из справочника находим, что $I_{обр\,max}=300$ мкА. Тогда, подставляя численные значения величин в формулу для $R_ш$, получаем

$$R_ш \leqslant \frac{5\cdot 300-1{,}1\cdot 1000}{(5-1)\cdot 300\cdot 10^{-6}}=333 \text{ кОм}.$$

Возьмем $R_ш=300$ кОм.

Следовательно, схема для выпрямления имеет вид, показанный на рис. 7.17.

7.92. Составить и рассчитать выпрямительную цепочку, позволяющую получить выпрямленный ток $I_{выпр}=400$ мА, если используются диоды Д226.

Решение. Поскольку требуемый выпрямленный ток превышает максимально допустимое значение тока одного диода (при максимальной температуре $I_{выпр\,max}=200$ мА), то необходимо несколько диодов соединить параллельно. Ввиду возможного разброса прямых сопротивлений диодов (диоды одного типа могут иметь разброс прямых сопротивлений порядка десятков процентов) для выравнивания токов, протекающих через диоды, необходимо последовательно с диодами включать добавочные резисторы.

Требуемое число диодов определяется по формуле

$$n=I_m/(k_т I_{выпр\,max}),$$

где $k_т$ — коэффициент нагрузки по току (принимает значение от 0,5 до 0,8).

При $k_т=0{,}8$

$$n=400/(0{,}8\cdot 200)=2{,}5.$$

Возьмем $n=3$.

Значения сопротивлений добавочных резисторов найдем по формуле

$$R_{доб} \geqslant \frac{U_{пр.ср}(n-1)}{nI_{выпр\,max} - 1{,}1I_m},$$

где $U_{пр.ср}$ — среднее прямое падение напряжения на диоде; коэффициент 1,1 учитывает 10%-ный разброс сопротивлений резисторов.

Пользуясь справочником, находим:

$$R_{доб} \geqslant \frac{1(3-1)}{3\cdot 300\cdot 10^{-3} - 1{,}1\cdot 400\cdot 10^{-3}} = 4{,}35 \text{ Ом}.$$

Возьмем $R_{доб}=5$ Ом.

Схема показана на рис. 7.18.

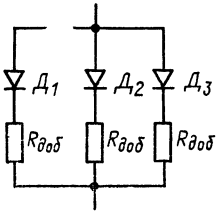


Рис. 7.18.

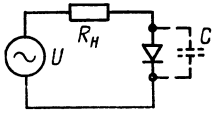


Рис. 7.19.

7.93. При прямом напряжении 1 В максимально допустимый ток диода равен 50 мА. Если этот диод соединить последовательно с резистором нагрузки $R_н=100$ Ом, то каково будет наибольшее значение напряжения источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме?

7.94. Источник постоянного напряжения 11 В соединен последовательно с резистором и полупроводниковым диодом для подачи на диод прямого напряжения. Каково должно быть наименьшее значение сопротивления резистора, чтобы не превышать предельных значений, данных в предыдущей задаче?

7.95. Сплавной диод работает в простейшей схеме выпрямления с резистором нагрузки $R_н=10$ кОм (рис. 7.19). Диод имеет $R_{пр}=40$ Ом, $R_{обр}=400$ кОм и $C=80$ пФ. Найти, на какой частоте выпрямленный ток за счет влияния емкости диода C уменьшится в 2 раза.

Решение. Учитывая, что $R_н \gg R_{пр}$ и $R_н \ll R_{обр}$, можно считать на низких частотах $I_{пр max} \approx U_{max}/(R_н+R_{пр}) \approx U_{max}/R_н$ и $I_{обр max}=U_{max}/(R_н+R_{обр}) \approx U_{max}/R_{обр} < I_{пр}$.

На высокой частоте по-прежнему $I_{пр} \approx U/R_н$, а $I_{обр} = U/Z_{обр}$. При уменьшении $I_{выпр}$ в 2 раза должно быть

$I_{обр}=0{,}5I_{пр}$, следовательно, $Z=2R_н$. Можно считать, что $Z=\sqrt{R_н^2+X_C^2}$, так как $X_C \ll R_{обр}$. Отсюда $X_C=\sqrt{Z^2-R_н^2}=$ $=\sqrt{4R_н^2-R_н^2}=\sqrt{3}R_н=1{,}73R_н=1{,}73\cdot10^4$ Ом. Так как $X_C=1/(2\pi fC)$, то

$$f=\frac{1}{2\pi X_C C}\approx\frac{10^{12}}{6{,}28\cdot80\cdot1{,}73\cdot10^4}=10^6/8{,}68=115\cdot10^3\ \text{Гц}=$$
$$=115\ \text{кГц}.$$

7.96. У полупроводникового диода $R_{пр}=40$ Ом; $R_{обр}=$ $=0{,}4$ МОм; $C=80$ пФ. Определить: а) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно $R_{обр}$ и вследствие этого произойдет заметное увеличение обратного тока (но он все еще будет малым); б) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно $R_{пр}$ и произойдет резкое ухудшение выпрямляющего действия диода.

Решение.

$X_C=1/(2\pi fC)$; $f=1/(2\pi X_C C)=10^{12}/(6{,}28\cdot4\cdot10^5\cdot80)=5$ кГц.

Поскольку 0,4 МОм в 10^4 раз больше 40 Ом, то $f=$ $=5\cdot10^3\cdot10^4=5\cdot10^7=50$ МГц ($\lambda\approx6$ м).

7.97. Известно, что электрический пробой диода имеет место при напряженности электрического поля $E_{max}=$ $=2\cdot10^5$ В/см. Показать, что при $N_д \gg N_а$ напряжение пробоя диода может быть найдено из уравнения

$$U_{max}=\frac{\varepsilon E^2_{max}}{2eN_а}.$$

Заметим, что напряжение пробоя зависит от концентрации акцепторной примеси.

7.98. Нарисуйте и поясните вольт-амперную характеристику полупроводникового стабилитрона.

7.99. Пользуясь вольт-амперной характеристикой диода Д813, определить при $T=20$ °С: а) напряжение стабилизации (см. справочник); б) максимально допустимый прямой ток, если максимально допустимая рассеиваемая мощность диода равна 125 мВт.

7.100. Как зависит температурный коэффициент напряжения (ТКН) от вида пробоя p-n-перехода в полупроводниковом стабилитроне? Для каких напряжений p-n-перехода ТКН близок к нулю? Каким способом можно уменьшить ТКН полупроводниковых стабилитронов?

7.101. Для стабилизации напряжения в схеме подберите по справочнику полупроводниковый стабилитрон и рассчи-

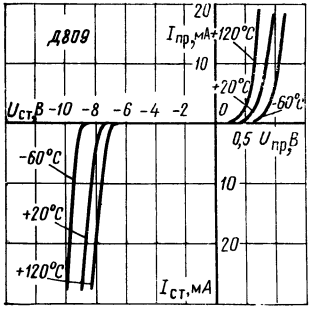


Рис. 7.20.

гайте необходимое сопротивление ограничительного резистора, если сопротивление нагрузки $R_н = 500$ Ом. Необходимое напряжение стабилизации $U_{ст} = 10$ В. Напряжение источника питания $E = 16$ В.

7.102. Пользуясь вольт-амперной характеристикой полупроводникового стабилитрона Д808 (рис. 7.20), графически определите рабочий режим стабилитрона ($U_{ст}$, $I_{ст}$), подключенного последовательно с ограничительным резистором $R_{огр} = 500$ Ом к источнику питающего напряжения $E = 13$ В при $T = 20$ °С. Определите параметры R_0, $r_{диф}$ для указанного выше режима и найдите значения ТКН стабилитрона.

7.103. Для стабилизации напряжения на нагрузке используется полупроводниковый стабилитрон, напряжение стабилизации которого постоянно и равно $U_{ст} = 10$ В. Определить допустимые пределы изменения питающего напряжения, если максимальный ток стабилитрона $I_{ст max} = 30$ мА, минимальный ток стабилитрона $I_{ст min} = 1$ мА, сопротивление нагрузки $R_н = 1$ кОм и сопротивление ограничительного резистора $R_{огр} = 0{,}5$ кОм.

Решение. Напряжение источника питания

$$E = U_{ст} + R_{огр}(I_н + I_{ст}). \qquad (1)$$

Ток через нагрузку $I_н$ определим по формуле

$$I_н = U_{ст}/R_н. \qquad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$E = U_{ст}(1 + R_{огр}/R_н) + I_{ст}R_{огр}.$$

Подставляя в эту формулу максимальное и минимальное значения тока через стабилитрон, получим максимальное и минимальное значения напряжений источника питания:

$$E_{min} = 10(1 + 0{,}5) + 1 \cdot 0{,}5 = 15{,}5 \text{ В};$$
$$E_{max} = 10(1 + 0{,}5) + 30 \cdot 0{,}5 = 30 \text{ В}.$$

7.104. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, определить пределы изменения сопротивления резистора нагрузки, если напряжение источника питания $E = 30$ В.

7.105. Кремниевый стабилитрон Д813 подключен для стабилизации напряжения к резистору $R_н$=2,2 кОм (рис. 7.21). Данные стабилитрона: напряжение стабилизации $U_{ст}$=13 В, максимальный ток стабилитрона $I_{ст\,max}$=20 мА, минимальный ток стабилитрона $I_{ст\,min}$=1 мА. Найти сопротивление ограничительного резистора, если напряжение источника E меняется от E_{min}=16 В до E_{max}=24 В. Определить, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменений E.

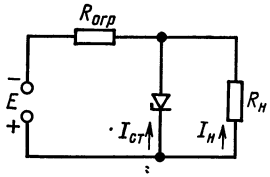


Рис. 7.21.

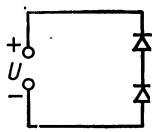


Рис. 7.22.

Решение. Сопротивление ограничительного резистора определим по формуле

$$R_{огр}=(E_{ср}-U_{ст})/(I_{ср.ст}+I_н),$$

где $E_{ср}=0{,}5(E_{min}+E_{max})=0{,}5(16+24)=20$ В.

Средний ток через стабилитрон

$$I_{ср.ст}=0{,}5(I_{ст\,min}+I_{ст\,max})=0{,}5(1+20)=10{,}5 \text{ мА}.$$

Ток через нагрузку

$$I_н=U_{ст}/R_н=13/(2{,}2\cdot10^3)=5{,}9 \text{ мА}.$$

Следовательно, сопротивление ограничительного резистора

$$R_{огр}=(20-13)/[(10{,}5+5{,}9)\cdot10^{-3}]=7/(17\cdot10^{-3})\approx430 \text{ Ом}.$$

Стабилизация будет обеспечена для изменения E в пределах от $E_{min}=U_{ст}+(I_{ст\,min}+I_н)R_{огр}=13+(10^{-3}+5{,}9\times10^{-3})\cdot430\approx16$ В до $E_{max}=U_{ст}+(I_{ст\,max}+I_н)R_{огр}=13+(20\cdot10^{-3}+5{,}9\cdot10^{-3})\cdot430=24{,}1$ В.

Таким образом, стабилизация получается во всем диапазоне изменений E.

7.106. Обратные токи насыщения двух диодов на рис. 7.22 равны 1 и 2 мкА. Напряжения пробоя диодов одинаковы и равны 100 В. Определить токи диодов и напряжения на них, если подводимое обратное напряжение равно: а) 90 В; б) 110 В.

7.107. Решить предыдущую задачу, если каждый диод шунтирован сопротивлением 10 МОм.

7.108. Полупроводниковый стабилитрон включен для стабилизации напряжения на нагрузке (см. рис. 7.21). Напряжение стабилизации $U_{ст}$=50 В, максимальный ток стабилитрона $I_{стmax}$=40 мА, минимальный ток стабилитрона $I_{стmin}$=5 мА, напряжение источника питания E=200 В. Вычислить ограничительное сопротивление $R_{огр}$, если ток нагрузки меняется от $I_н$=0 до $I_{нmax}$. Чему равен максимальный ток нагрузки $I_{нmax}$?

7.109. Используя значение сопротивления ограничительного резистора, найденное в предыдущей задаче, найти возможные пределы изменения питающего напряжения, если ток нагрузки $I_н$=25 мА.

7.110. Полупроводниковый стабилитрон Д815Г ($U_{ст}$=6,8 В) включили последовательно с кремниевым диодом, смещенным в прямом направлении, чтобы получить схему с нулевым ТКН. Температурный коэффициент напряжения кремниевого диода равен —3,4 мВ/град. Выразить в процентах на градус необходимый ТКН стабилитрона.

7.111. Определить обратный ток насыщения германиевого диода при T=70 °С, если при T=20 °С его обратный ток насыщения I_0=10 мкА.

7.112. Барьерная емкость полупроводникового диода с резким переходом равна 25 пФ при обратном напряжении 5 В. Определить уменьшение емкости при уменьшении обратного напряжения до 7 В.

Решение. Пренебрегая контактной разностью потенциалов, можно записать:

$$C_{б1}=k/U_1^{1/2},$$

где k — постоянная; U — обратное напряжение, откуда

$$k=C_{б1}U_1^{1/2}.$$

Тогда при уменьшении обратного напряжения до 7 В барьерная емкость

$$C_{б2}=k/U_2^{1/2}=C_{б1}U_1^{1/2}/U_2^{1/2}=25\sqrt{5}/\sqrt{7}=21 \text{ пФ}.$$

Следовательно, емкость уменьшится на $\Delta C=C_{б1}-C_{б2}$=25—21=4 пФ.

7.113. Диод при обратных напряжениях 0,1; 0,5 и 0,9 В имеет барьерные емкости, равные соответственно: 50; 44,7 и 41,1 пФ. а) Что можно сказать о законе распределения примеси около p-n-перехода? б) Из какого материала выполнен переход — из кремния или из германия?

7.114. Изобразить полную схему замещения варикапа и пояснить, как определяются ее параметры. Какой величиной характеризуется нелинейность варикапов в рабочем интервале напряжений?

7.115. Пользуясь справочником, определить емкость варикапа Д901В при комнатной температуре и максимальном обратном напряжении.

7.116. Пользуясь справочником, определить при номинальном напряжении изменение емкости варикапа Д901В, вызванное изменением температуры окружающей среды от 20 до 100 °С.

7.117. Пользуясь справочником, определить добротность варикапа Д901В при температуре окружающей среды, равной 25 °С.

7.118. Определить предельную рабочую частоту и добротность, диапазон перекрытия по емкости варикапа, если максимальное напряжение варикапа U=80 В, номинальная емкость $C_в$ при напряжении 4 В равна 28 пФ, коэффициент перекрытия n=4, а индуктивность вводов и контактов $L_в$= =1 мкГн.

7.119. Определить ширину электронно-дырочного перехода l_n и l_p в n- и p-областях соответственно, контактную разность потенциалов $\varphi_к$ и максимальное значение напряженности электрического поля E_{max} в p-n-переходе кремниевого туннельного диода при T=300 К с $N_а$=$N_д$= =10^{19} см$^{-3}$.

7.120. В германиевом туннельном диоде концентрация акцепторной примеси равна концентрации донорной примеси, причем на каждые 10^3 атомов германия приходится один атом примеси. Определить при T=300 К: а) контактную разность потенциалов; б) ширину области объемного заряда.

7.121. Решить предыдущую задачу, если используется кремниевый полупроводниковый диод.

7.122. По вольт-амперной характеристике туннельного диода ГИ304 при T=300 К (рис. 7.23) определить следующие параметры: $r_{диф}$; $I_п/I_в$; $U_п$; $U_в$.

7.123. Начертите график зависимости дифференциального сопротивления от подводимого напряжения туннельного диода ГИ304, вольт-амперная характеристика которого изображена на рис. 7.23. Используйте значения напряжений в интервале от 0 до 0,45 В.

7.124. Два туннельных диода ГИ304, вольт-амперная характеристика которых изображена на рис. 7.23, соединены последовательно (рис. 7.24). Построить суммарную вольт-амперную характеристику.

7.125. Два туннельных диода ГИ304 включены параллельно (рис. 7.25). Построить суммарную вольт-амперную характеристику. Вольт-амперная характеристика каждого диода изображена на рис. 7.23.

7.126. Аппроксимированная вольт-амперная характеристика одного туннельного диода изображена на рис. 7.26. Здесь $I_п=10I_в$, $U_в=7U_п$, $U_{pp}=8{,}5U_п$. Другой туннельный диод имеет такую же вольт-амперную характеристику, но

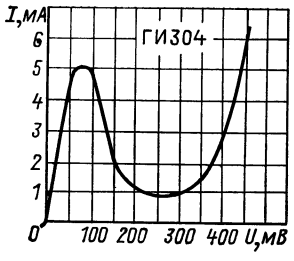


Рис. 7.23.

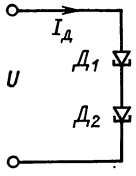


Рис. 7.24.

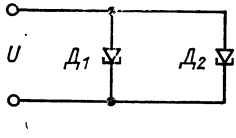


Рис. 7.25.

его максимальный ток составляет 0,8 максимального тока первого диода ($I_{п2}=0{,}8I_{п1}$). Построить суммарную вольт-амперную характеристику этих диодов, соединенных последовательно.

7.127. Два туннельных диода ГИ304 (см. рис. 7.23) включены встречно (рис. 7.27). Построить суммарную вольт-амперную характеристику.

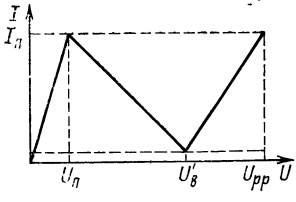


Рис. 7.26.

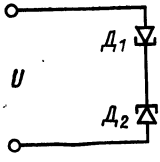


Рис. 7.27.

7.128. Последовательно с диодом ГИ304 (см. рис. 7.23) включен резистор, сопротивление которого $R=2U_в/I_п$, где $U_в$ и $I_п$ — соответственно минимальное напряжение и максимальный ток туннельного диода. Построить вольт-амперную характеристику этого соединения.

7.129. Параллельно с диодом ГИ304 (см. рис. 7.23) включен резистор сопротивлением $R=2U_п/I_в$, где $U_п$ — максимальное напряжение туннельного диода; $I_в$ — минималь-

ный ток туннельного диода. Построить зависимость общего тока от напряжения на диоде.

7.130. Последовательно с туннельным диодом ГИ304 (см. рис. 7.23) включен полупроводниковый диод Д305, вольт-амперная характеристика которого изображена на рис. 7.2,*б*. Построить зависимость тока в этой цепи от подводимого напряжения.

7.131. Параллельно туннельному диоду ГИ304 (см. рис. 7.23) включен резистор сопротивлением R. Найти такое значение этого сопротивления, при котором суммарная вольт-амперная характеристика не имеет области с отрицательным сопротивлением. Построить эту характеристику.

7.132. Пользуясь вольт-амперной характеристикой туннельного диода ГИ304, определить напряжение E источника питания и сопротивление нагрузки (см. рис. 7.23), обеспечивающие работу туннельного диода в схеме усиления.

7.133. Определить предельное значение рабочей частоты для туннельного германиевого диода, имеющего следующие параметры; $I_п=10$ мА, $I_п/I_в=4{,}5$, $U_п=0{,}06$ В, $U_{рр}=0{,}4$ В, емкость $C=50$ пФ, а также найдите среднее дифференциальное сопротивление на падающем участке характеристики, объемное сопротивление R_s и постоянную времени переключения $\tau_{пер}$, если $U_в=0{,}18$ В, радиус *p-n*-перехода $r=0{,}05$ см, а удельная проводимость примесного германия $\sigma=8$ См/см.

Глава восьмая

ТРАНЗИСТОРЫ

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Физические процессы в транзисторе

8.1. Изобразите схемы включения с общей базой для транзисторов типов *p-n-p* и *n-p-n*. Покажите полярности питающих напряжений для случаев работы транзистора: а) в активном режиме; б) в режиме отсечки; в) в режиме насыщения; г) в инверсном режиме. На обеих схемах показать направления токов эмиттера $I_э$, коллектора $I_к$, базы $I_б$ для всех режимов работы.

8.2. Транзистор типа *p-n-p* включен по схеме с общим эмиттером. Пояснить, в каком режиме работает транзистор, если: а) напряжение база—эмиттер $U_{бэ}=-0{,}4$ В и напряжение коллектор—эмиттер $U_{кэ}=-0{,}3$ В; б) напряжение

$U_{БЭ}=-0{,}4$ В и напряжение $U_{КЭ}=-10$ В; в) напряжение $U_{БЭ}=0{,}4$ В и напряжение $U_{КЭ}=-10$ В.

8.3. Транзистор типа *n-p-n* включен по схеме с общей базой. Напряжение эмиттер — база $U_{ЭБ}=-0{,}5$ В, напряжение коллектор — база $U_{КБ}=12$ В. Определить напряжение коллектор — эмиттер.

8.4. Транзистор типа *p-n-p* включен по схеме с общим эмиттером. Напряжение база — эмиттер $U_{БЭ}=-0{,}8$ В, напряжение коллектор — эмиттер $U_{КЭ}=-10$ В. Определить напряжение коллектор — база.

8.5. Выводы электродов транзистора маркированы *A*, *B*, *C*. Токи, снимаемые с этих выводов в активном режиме транзистора, равны: $I_A=1$ мА, $I_B=20$ мкА, $I_C=+1{,}02$ мА. Определить: а) с какими электродами транзистора соединены выводы? б) чему равен коэффициент передачи постоянного тока базы транзистора (обратный ток коллекторного перехода принять равным нулю)?

8.6. Нарисуйте энергетические диаграммы для *p-n-p*-транзистора в отсутствие напряжений между выводами и работающего в активном режиме. Покажите также распределение концентрации дырок в транзисторе и сопоставьте эту диаграмму с током коллектора. Объясните термины «эффективность эмиттера» и «коэффициент переноса» и выделите физические параметры, которые влияют на их значения. Рассмотрите факторы, определяющие выбор концентрации примесей для базовой и коллекторной областей.

8.7. На примере *n-p-n*-транзистора объясните принцип его действия. Что случится с транзистором, включенным в усилительный каскад, если его базу закоротить с эмиттером?

8.8. Транзистор *p-n-p* работает в активном режиме. Какие физические процессы определяют ток базы в транзисторе? Как следует изменить конструкцию транзистора, чтобы уменьшить различные компоненты тока базы? Если при постоянном напряжении эмиттер — база подается небольшой переменный сигнал, то какой механизм приводит к появлению дополнительной компоненты тока базы?

8.9. На примере *p-n-p*-транзистора укажите механизм прохождения тока через базу и назовите факторы, управляющие эмиттерным, базовым и коллекторным токами. Начертите диаграммы, показывающие зависимость концентрации неосновных носителей заряда в эмиттере, базе и коллекторе от расстояния.

Если ширина базы w, площадь базы $П$, а время жизни дырок в базе τ_p, выведите выражение для составляющей

тока базы, связанной с рекомбинацией дырок. Можно считать приближенно, что распределение концентрации дырок в базовой области задается уравнением

$$p_б(x) = p_{б0} e^{eU/(kT)} \operatorname{sh}\frac{w-x}{L_p} \operatorname{sh}^{-1}\frac{w}{L_p},$$

где $p_{б0}$ — равновесная концентрация дырок в базе на границе с эмиттерным переходом; U — напряжение эмиттер — база; L_p — диффузионная длина дырок. Каковы другие составляющие тока базы?

8.10. Нарисуйте диаграмму, показывающую распределение электронной и дырочной составляющих токов в различных областях *p-n-p*-транзистора в активном режиме, и покажите, что ток базы $I_Б = I_Э(1-\alpha) - I_{КБ0}$.

8.11. Концентрации примесей в базе, эмиттере и коллекторе некоторого транзистора *p-n-p* и ширина базы контролируются так, что только 1% дырок, инжектируемых из эмиттера, теряется при рекомбинации в базе. Пренебрегая токами утечки, найти коэффициент передачи тока эмиттера, эффективность эмиттера, коэффициент переноса, если электронная составляющая тока эмиттера $I_{nЭ} = 0{,}01 I_Э$ (коэффициент умножения в коллекторном переходе принять равным единице).

Решение. Эффективность эмиттера (коэффициент инжекции)

$$\gamma = I_{pЭ}/(I_{pЭ} + I_{nЭ}) = (I_Э - I_{nЭ})/I_Э = 1 - I_{nЭ}/I_Э = 1 - 0{,}01 = 0{,}99.$$

Коэффициент переноса

$$\beta^* = I_{pК}/I_{pЭ} = (I_{pЭ} - 0{,}01 I_{pЭ})/I_{pЭ} = 0{,}99.$$

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \gamma\beta^* M,$$

где коэффициент умножения $M = 1$. Следовательно,

$$\alpha = 0{,}99 \cdot 0{,}99 \cdot 1 = 0{,}98.$$

8.12. Какое влияние на эффективность эмиттера и коэффициент переноса оказывает увеличение удельной проводимости области базы в двух случаях: а) при пропорциональном изменении удельной проводимости эмиттерной области; б) при неизменной удельной проводимости эмиттерной области?

8.13. Объясните, почему при изменении удельной проводимости области базы изменяется коэффициент передачи тока эмиттера, даже если эффективность эмиттера поддер-

живается постоянной путем одновременного изменения удельной проводимости эмиттерной области.

8.14. Покажите, что в активном режиме в транзисторе *p-n-p* отношение дырочного и электронного токов $I_{pэ}/I_{nэ}$, протекающих через эмиттерный переход, прямо пропорционально отношению удельных проводимостей материалов *p*- и *n*-типа.

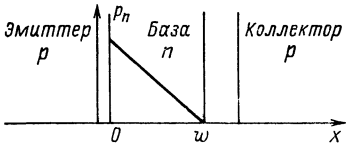


Рис. 8.1.

8.15. В *n-p-n*-транзисторе концентрация доноров в эмиттере $N_д=10^{24}$ м$^{-3}$, концентрация акцепторов в базе $N_а=10^{22}$ м$^{-3}$. Считая, что подвижности электронов и дырок равны 0,4 и 0,2 м^2/(В·с) соответственно, определить отношение дырочного тока к электронному на переходе эмиттер — база.

Решение. Отношение дырочного тока к электронному на *p-n*-переходе примерно равно отношению удельных проводимостей материалов базы и эмиттера, которые составляют *p-n*-переход, для любых напряжений смещения. Следовательно,

$$I_p/I_n=\sigma_p/\sigma_n=e\mu_p N_а/(e\mu_n N_д),$$

где $N_а$ и $N_д$ — концентрации акцепторов и доноров.

В рассматриваемом случае

$$I_p/I_n=10^{22}\cdot 0{,}2/(10^{24}\cdot 0{,}4)=1/200.$$

8.16. На рис. 8.1 показана зависимость концентрации дырок от расстояния в базе *p-n-p*-транзистора. Напряжения смещения равны: $U_{эб}=0{,}3$ В, $U_{кб}=-7$ В, а ток $I_к=I_э=1{,}0$ мА. Начертите в одинаковом масштабе кривые изменения концентрации дырок для каждого из следующих случаев: а) $U_{кб}=-7$ В; $I_э=2$ мА; б) $U_{эб}=0{,}3$ В, $U_{кб}=-0{,}1$ В; в) $I_э=2$ мА, $U_{кб}=-0{,}1$ В; г) $U_{эб}=0{,}3$ В, $U_{кб}=-30$ В.

8.17. В транзисторе *n-p-n* избыточная концентрация электронов на эмиттерном переходе равна 10^{20} м$^{-3}$. Площади переходов *П* одинаковы и равны $1\cdot 10^{-6}$ м^2. Постройте график примерного распределения концентрации электронов в области базы и определите ток коллектора, если эффективная ширина базы $4\cdot 10^{-5}$ м, подвижность электронов при $T=300$ К $\mu=0{,}39$ м^2/(В·с).

Решение. Предположим, что ширина базы много меньше диффузионной длины электронов (неосновных носителей), концентрация акцепторных примесей в базе значительно ниже концентрации донорных примесей в эмиттере и коллекторе, в базовой области отсутствует рекомбинация носителей, т. е. распределение электронов в базе линейное, концентрация неосновных носителей на коллекторном переходе равна нулю.

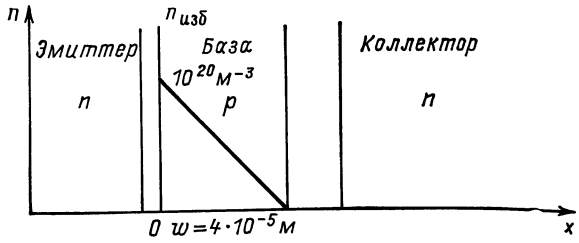


Рис. 8.2.

Исходя из этих допущений, построим примерное распределение концентрации электронов в базе (рис. 8.2).

Плотность тока неосновных носителей заряда (электронов) в базе

$$j_n = eD_n \frac{dn_э}{dx}.$$

Коэффициент диффузии вычислим из соотношения Эйнштейна:

$$D_n/\mu_n = kT/e,$$

откуда

$$D_n = kT\mu_n/e = 1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300\cdot0{,}39/(1{,}602\cdot10^{-19}) = 1\cdot10^{-2}\ м^2/с.$$

Определим градиент концентрации электронов в базе:

$$\frac{dn_э}{dx} = -\frac{10^{20}}{4\cdot10^{-5}} = -0{,}25\cdot10^{25}\ м^{-4}.$$

Принимая за положительное направление ток коллектора в активном режиме, имеем:

$$I_К \approx -j_n П = -eD_n \frac{dn_э}{dx} П = 1{,}6\cdot10^{-19}\cdot1\cdot10^{-2}\times$$

$$\times 0{,}25\cdot10^{25}\cdot1\cdot10^{-6} = 4\ мА.$$

8.18. В *p-n-p*-транзисторе площади эмиттерного и коллекторного переходов одинаковы и равны $1\cdot10^{-6}$ м^2, коэффициент диффузии дырок в базе $D_p = 4{,}7\cdot10^{-3}$ м^2/с. При

$U_{КБ}$ =—1 В распределение концентрации дырок в базе имеет вид, показанный на рис. 8.3.

Требуется: а) пренебрегая токами утечки, определить ток эмиттера, обусловленный дырками; б) вычислить диф-

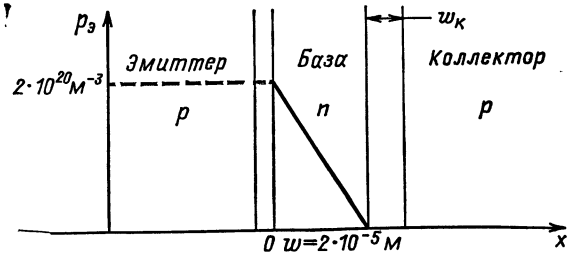


Рис. 8.3.

ференциальное сопротивление между коллектором и базой при $U_{КБ}$ =—16 В, если толщина обедненного носителями заряда слоя коллекторного перехода $w_к=(1+\sqrt{|U_{КБ}|})\cdot10^{-6}$ м. Предположить, что условия на переходе эмиттер — база не изменяются и соответствуют условиям, показанным на рис. 8.3.

Решение. Плотность дырочного тока в базе

$$j_p=-eD_p\frac{dp_э}{dx};$$

дырочный ток эмиттера

$$I_p=-eD_p\frac{dp_э}{dx}П.$$

Градиент концентрации дырок (рис. 8.3)

$$\frac{dp_э}{dx}=-\frac{p_э}{w}=-\frac{2\cdot10^{20}}{2\cdot10^{-5}}=-1\cdot10^{25}\text{ дырок/м}^4.$$

Следовательно,

$$I_p=j_pП=-eD_p\frac{dp_э}{dx}П=1{,}602\cdot10^{-19}\cdot47\cdot10^{-4}(1\times$$
$$\times10^{25})\cdot10^{-6}=7{,}5\text{ мА}.$$

Ток коллектора

$$I_К=eD_pПp_э/(w_{полн}-w_к)=eD_pПp_э/w,$$

где w — эффективная ширина базы.

Следовательно, $w_{полн}=w+w_к=2\cdot10^{-5}+(1+\sqrt{|U_{КБ}|})\times$ $\times10^{-6}$; при $U_{КБ}=-1$ В $w_{полн}=2\cdot10^{-5}+2\cdot10^{-6}=2{,}2\cdot10^{-5}$ м, тогда

$$I_К=\frac{eD_pПp_э}{[w_{полн}-(1+\sqrt{|U_{КБ}|})\cdot10^{-6}]}.$$

Продифференцируем это выражение по $U_{КБ}$:

$$\left|\frac{dI_К}{dU_{КБ}}\right|=\frac{eD_pП_{p_э}(+|U_{КБ}|^{-1/2}/2)\cdot10^{-6}}{[w_{полн}-(1+\sqrt{|U_{КБ}|})\cdot10^{-6}]^2}.$$

При $U_{КБ}=-16$ В

$$\left|\frac{dI_К}{dU_{КБ}}\right|=\frac{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot4{,}7\cdot10^{-3}\cdot10^{-6}\cdot2\cdot10^{20}\,(16^{-1/2}/2)\cdot10^{-6}}{[2{,}2\cdot10^{-5}-(1+\sqrt{16})\cdot10^{-6}]^2}=$$

$$=\frac{1{,}88\cdot10^{-14}}{2{,}89\cdot10^{-10}}\text{ См}.$$

Дифференциальное сопротивление

$$r_{КБ}=\left|\frac{dU_{КБ}}{dI_{КБ}}\right|=\frac{2{,}89\cdot10^{-10}}{1{,}88\cdot10^{-14}}\cong15{,}4\text{ кОм}.$$

8.19. Через транзистор типа *p-n-p* течет постоянный ток и концентрация дырок в базе превышает свое равновесное значение. Что будет происходить в результате этого с концентрацией электронов в базе?

8.20. Используя уравнения Эберса — Молла, показать, что ток эмиттера в транзисторе в активном режиме определяется приближенным выражением

$$I_э\approx I_{ЭБК}e^{U_{ЭБ}/U_т},$$

где $I_{ЭБК}=I_{ЭБ0}/(1-\alpha\alpha_I)$;

здесь $I_{ЭБ0}$ — обратный ток эмиттера при $I_К=0$; α — коэффициент передачи эмиттерного тока; α_I — коэффициент передачи коллекторного тока при инверсном включении; $U_т=kT/e$ — температурный потенциал.

8.21. Рассчитать и построить график зависимости тока эмиттера от напряжения $U_{ЭБ}$ идеального транзистора, у которого коэффициент передачи эмиттерного тока $\alpha=0{,}98$, обратный ток коллектора $I_{КБ0}=2$ мкА, обратный ток эмиттера $I_{ЭБ0}=1{,}6$ мкА, если: а) напряжение коллекторного перехода $U_{КБ}=0$; б) на коллекторный переход подано

обратное напряжение 10 В. Распределенным сопротивлением базы пренебречь.

8.22. Покажите, что для идеального транзистора, работающего в режиме отсечки, токи эмиттера и коллектора определяются выражениями:

$$I_Э = \frac{-I_{ЭБ0}(1-\alpha)}{1-\alpha\alpha_I}; \quad I_К = \frac{I_{КБ0}(1-\alpha_I)}{1-\alpha\alpha_I}.$$

8.23. Покажите, что для идеального транзистора типа *p-n-p* при обратном напряжении на коллекторном переходе ток эмиттера равен нулю, если напряжение эмиттерного перехода $U_{ЭБ} = U_Т \ln(1-\alpha)$.

8.24. Определить эмиттерный и коллекторный токи для идеального транзистора, работающего в режиме отсечки, если обратный ток коллектора $I_{КБК} = 5$ мкА, обратный ток эмиттера $I_{ЭБК} = 3{,}6$ мкА, коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha = 0{,}96$.

8.25. Прямой ток эмиттера транзистора *n-p-n* составляет $I_Э = 2$ мА, коллекторная цепь разорвана. Определить:

а) напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах;

б) напряжение эмиттер—коллектор, полагая $I_{КБ0} = 2$ мкА, $I_{ЭБ0} = 1{,}6$ мкА, $\alpha = 0{,}98$. В каком режиме работает транзистор?

Решение.

а) $I_К = 0$, $I_Э = 2$ мА и $U_{БЭ} = U_Т \ln(1 + I_Э/I_{ЭБ0})$,

откуда

$$U_{БЭ} = 0{,}026 \ln[1 + 2/(1{,}6 \cdot 10^{-3})] = 0{,}026 \ln(1250) = 0{,}1853 \text{ В}.$$

Напряжение база—коллектор

$$U_{БК} = U_Т \ln(1 + \alpha I_Э/I_{КБ0}) = 0{,}026 \ln\left(1 + \frac{0{,}98 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-6}}\right) = 0{,}179 \text{ В}.$$

Следовательно, транзистор работает в режиме насыщения.

б) Напряжение эмиттер — коллектор

$$U_{ЭК} = U_{БК} - U_{БЭ} = 0{,}179 - 0{,}1853 = -0{,}0063 \text{ В}.$$

8.26. Определить постоянный ток базы *p-n-p*-транзистора при температуре $T=300$ К. Током утечки перехода база — эмиттер пренебречь. Ток коллектора $I_К=1$ мА. Время жизни носителей $\tau_p=1{,}7\cdot10^{-6}$ с, подвижность дырок $\mu_p=0{,}2$ м²/(В·с), ширина базы $w=10^{-5}$ м.

8.27. Транзистор *p-n-p* имеет следующие параметры: $\alpha=0{,}99$, $\alpha_I=0{,}9$, $I_{ЭБК}=10^{-6}$ А, $I_{КБК}=1{,}1\cdot10^{-6}$ А, $T=300$ К. Определить токи транзистора $I_Э$, $I_Б$, $I_К$, если: а) $U_{ЭБ}=-5$ В и $U_{КБ}=-10$ В; б) $U_{ЭБ}=0{,}25$ В и $U_{КБ}=-10$ В; в) $U_{ЭБ}=0{,}25$ В и $U_{КБ}=0{,}2$ В.

8.28. У некоторого транзистора типа *p-n-p* $\alpha=0{,}98$, $I_{КБ0}=5$ мкА, $I_{ЭБ0}=3{,}57$ мкА, Определить токи транзистора $I_К$ и $I_Э$, если оба *p-n*- перехода смещены в обратном направлении.

8.29. У некоторого *p-n-p*- транзистора $\alpha=0{,}98$, $\alpha_I=0{,}8$, $I_{КБК}=10^{-9}$ А, $I_{ЭБК}=0{,}816\cdot10^{-9}$ А. Определить: а) токи $I_Э$ и $I_К$, если напряжения $U_{ЭБ}=-0{,}36$ В и $U_{КБ}=10$ В; б) напряжение коллектор—эмиттер, если $I_Э=10$ мА и $I_К=5$ мА (режим насыщения).

8.30. При обратном напряжении на эмиттерном переходе при температуре окружающей среды $T=25$ °С ток эмиттера равен 10^{-12} А. Чему будет равен (теоретически) ток эмиттера при прямом напряжении 0,7 В? Какой это транзистор, германиевый или кремниевый? (Влиянием температуры на ток пренебречь.)

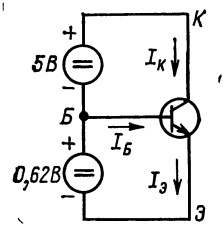


Рис. 8.4.

8.31. Транзистор, имеющий $\alpha=0{,}995$, $\alpha_I=0{,}1$, $I_{ЭБК}=10^{-14}$ А, $I_{КБК}=10^{-13}$ А, включен в схему на рис. 8.4. Определить напряжение коллектор—эмиттер $U_{КЭ}$, а также токи $I_Э$, $I_К$, $I_Б$.

Решение. Напряжение коллектор — эмиттер найдем из выражения

$$U_{ЭБ}+U_{БК}+U_{КЭ}=0,$$

откуда

$$U_{КЭ}=5+0{,}62=5{,}62 \text{ В}.$$

Определим ток коллектора:

$$I_К = \alpha I_{ЭБК}(e^{eU_{БЭ}/(kT)} - 1) - I_{КБК}(e^{eU_{БК}/(kT)} - 1).$$

Заметим, что в последнем слагаемом членом с экспоненциальным множителем можно пренебречь из-за большого отрицательного $U_{БК}$.

Подставляя значения величин из условия задачи, получаем:

$$I_К = 0{,}995 \cdot 10^{-14}\ (e^{0{,}62/0{,}026} - 1) - 10^{-13}(e^{-5/0{,}026} - 1) = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\ А.$$

Определяем ток эмиттера по формуле

$$I_Э = +I_{ЭБК}(e^{eU_{БЭ}/(kT)} - 1) - \alpha_I I_{КБК}(e^{eU_{БК}/(kT)} - 1) =$$
$$= 10^{-14}(2{,}3 \cdot 10^{10}) - 10^{-14} = +2{,}3 \cdot 10^{-4}\ А.$$

Ток базы

$$I_Б = -I_К + I_Э = 0.$$

В действительности ток базы не равен нулю. Неверный результат получили из-за приблизительного подсчета тока коллектора:

$$I_К = 0{,}995 \cdot 2{,}3 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{10} = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\ А.$$

Следовательно,

$$I_Б = -0{,}995 \cdot 2{,}3 \cdot 10^{-4} + 2{,}3 \cdot 10^{-4} = 1{,}15 \cdot 10^{-6}\ А.$$

8.32. Транзистор имеет следующие параметры: эффективность эмиттера $\gamma = 0{,}99$, коэффициент переноса $\beta^* = 0{,}995$, коэффициент умножения $M = 1{,}0$. Найти ток коллектора, если ток базы $I_Б = 20$ мкА, а обратный ток коллектора $I_{КБ0} = 1$ мкА.

8.33. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора $I_К = 1$ мА, ток базы $I_Б = 20$ мкА, обратный ток коллектора $I_{КБ0} = 10^{-8}$ А. Определить коэффициенты передачи по постоянному току α, $h_{21Э}$ и обратный ток коллектора $I_{КБ0}$.

8.34. У кремниевого сплавного *p-n-p*-транзистора ширина базы $w = 1$ мкм, удельное сопротивление базы $\rho_б = 0{,}5$ Ом·см, удельное сопротивление коллектора значительно меньше удельного сопротивления базы. Вычислить напряжение прокола базы.

8.35. При достаточно большом напряжении на коллекторном *p-n*-переходе его обедненный слой проникает сквозь базу и коллектор смыкается с эмиттером. Это явление, называемое проколом базы, происходит в некотором германиевом транзисторе при обратном напряжении на коллек-

торном переходе 30 В. Предполагая, что коллектор легирован примесями значительно больше, чем база, которая содержит концентрацию примесей 10^{21} м$^{-3}$, определить ширину базы при отсутствии напряжения смещения. Относительная диэлектрическая проницаемость германия $\varepsilon=16$.

8.36. Транзистор, описанный в задаче 8.35, имеет коэффициент передачи тока базы на низкой частоте $\beta=30$. Вычислите время жизни неосновных носителей заряда в базе (электронов), если эффективность эмиттера $\gamma=1{,}0$ и коэффициент диффузии электронов $D_n=0{,}0093$ м^2/с.

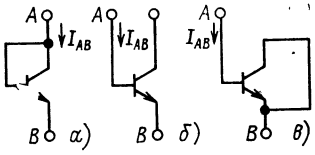


Рис. 8.5.

8.37. Некоторый *p-n-p*-транзистор имеет эффективную ширину базы $w=20$ мкм при некоторых напряжениях на переходах. Ширина эмиттерной области 5 мкм, и ее удельное сопротивление $\rho_э=50\cdot10^{-6}$ Ом·м. Эффективное время жизни в базе $\tau_p=20$ мкс и коэффициент диффузии дырок $D_p=0{,}0047$ м^2/(В·с). Вычислить коэффициент передачи тока базы β этого транзистора.

8.38. Определить остаточное напряжение U_0 транзистора, работающего при $T=300$ К и имеющего следующие параметры: $I_К=10$ мкА, $I_Б=20$ мкА; $\alpha=0{,}95$, $\alpha_I=0{,}7$. Включение прямое, сопротивлениями объемов областей коллектора и эмиттера пренебречь.

Решение. Остаточное напряжение транзистора U_0 — это напряжение между эмиттером и коллектором транзистора в режиме насыщения. Оно определяется разностью напряжений на открытых коллекторном и эмиттерном переходах. Остаточное напряжение

$$U_0=U_{КЭ}=\frac{kT}{e}\ln\left[\alpha_I\frac{1-I_К/(I_Б\beta)+I_{КБ0}/(I_Б\alpha)}{1+I_К/[I_Б(1+\beta_I)]+I_{ЭБ0}/I_Б}\right].$$

Учитывая, что

$$I_К/I_Б=10/20=0{,}5,\ \beta=\alpha/(1-\alpha)=0{,}95/(1-0{,}95)=19,$$

$$\beta_I=\alpha_I/(1-\alpha_I)=0{,}7/(1-0{,}7)=2{,}33$$

и пренебрегая членами уравнения, содержащими $I_{КБ0}/I_Б$, $I_{ЭБ0}/I_Б$, получаем

$$U_0=26\cdot10^{-3}\ln(0{,}7\cdot0{,}974/1{,}15)=14\ \text{мВ}.$$

8.39. В полупроводниковых интегральных микросхемах транзисторы часто используются в качестве диодов. На

рис. 8.5,*а—в* приведены три такие схемы включения. Транзистор имеет следующие параметры: $I_{ЭБК}=10^{-15}$ А; $I_{КБК}=10^{-14}$ А; $\alpha=0{,}99$; $\alpha_I=0{,}1$. Требуется: а) вывести аналитические выражения для вольт-амперных характеристик этих схем, т. е. зависимости $I_{AB}=f(U_{AB})$; б) начертить на одном и том же графике вольт-амперные характеристики для указанных схем включения в интервале изменений токов от 0 до 2 мА.

8.40. Дан кремниевый сплавной *p-n-p*-транзистор, имеющий следующие данные: удельное сопротивление эмиттера $\rho_э=0{,}1$ Ом·см, удельное сопротивление базы $\rho_б=25$ Ом·см, удельное сопротивление коллектора $\rho_к=5$ Ом·см, ширина базы $w=2{,}5\cdot10^{-3}$ см. Диаметры эмиттера и коллектора равны 0,05 см. Время жизни неосновных носителей заряда 50 мкс. Транзистор работает при $T=300$ К. Переходы транзистора резкие. Требуется: а) вычислить высоту потенциальных барьеров эмиттерного и коллекторного переходов; б) определить напряжение эмиттер — база $U_{ЭБ}$, при котором ток эмиттера $I_Э=1$ мА (предположить, что работа транзистора происходит в активном режиме при напряжении коллектор — база $U_{КБ}=-10$ В).

8.41. Чтобы оценить эффект модуляции ширины базы, вычислите коэффициент передачи тока эмиттера α транзистора, описанного в задаче 8.40, полагая, что напряжение коллекторного перехода $U_{КБ}=-40$ В.

8.42. Для транзистора, описанного в задаче 8.40, определить изменение ширины базы при изменении коллекторного напряжения $dw/dU_{КБ}$ (при напряжении коллекторного перехода $U_{КБ}=-10$ В).

8.43. Используя выражения для токов транзистора в активном режиме: $I_Э=I_К+I_Б$ и $I_К=\alpha I_Э+I_{КБ0}$, выведите выражение для тока коллектора через ток базы $I_Б$ и обратный ток коллектора $I_{КЭ0}$. Как, пользуясь выведенным выражением, можно построить выходные характеристики для транзистора в схеме с общим коллектором?

8.44. Начертите выходные характеристики транзистора типа *n-p-n* в схеме с общим эмиттером, если известно, что транзистор имеет следующие параметры: $\alpha=0{,}975$; $I_{КБ0}=10$ мкА; $R_{к.нас}=200$ Ом. График построить для токов до 50 мА и для напряжений коллекторного перехода до 20 В.

8.45. Кремниевый мощный транзистор имеет $\beta=45$; $I_{ЭБ0}=10^{-10}$ А и $I_{КБ0}=10^{-9}$ А. Требуется начертить: а) входные характеристики транзистора в активном режиме при изменении тока базы от $I_Б=0$ до $I_Б=100$ мА; б) выходные характеристики транзистора в активном режиме для $I_Б=5$, 10, 15 и 20 мА.

8.46. На рис. 8.6 изображены выходные характеристики транзистора типа *p-n-p* в схеме с общей базой. Определить: а) напряжение коллектор — база $U_{КБ}$, при котором ток коллектора $I_К=0$, если ток эмиттера $I_Э=10$ и 20 мА; б) какие изменения следует произвести на рисунке, чтобы он соответствовал аналогичному транзистору типа *n-p-n*.

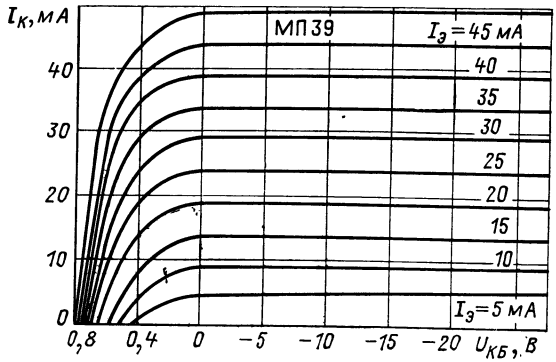


Рис. 8.6.

8.47. Обсудите сходства и различия выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером (см. рис. 8.8,*б*) и анодных характеристик пентода (см. рис. 5.10).

8.48. Транзистор *p-n-p* включен в схему с общей базой. Покажите, что дифференциальное сопротивление эмиттера можно приближенно вычислить по формуле $r_э \approx kT/(eI_Э)$, где $I_Э$ — ток эмиттера. Вычислить $r_э$ при $T=300$ К, если $I_Э=2$ мА.

Решение. Поскольку на эмиттерный переход подано прямое напряжение, то ток эмиттера может быть определен следующим образом:

$$I_Э \approx I_{ЭБК} e^{eU_{ЭБ}/(kT)},$$

где $I_{ЭБК}$ — обратный ток.

Тогда

$$r_э = \left.\frac{dU_{ЭБ}}{dI_Э}\right|_{U_{КБ}=const} = \frac{kT}{eI_Э},$$

и

$$r_э \approx kT/(eI_Э).$$

При $I_Э = 2$ мА и $T = 300$ К

$$r_э = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300/(1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}) = 13 \text{ Ом}.$$

8.49. У несимметричного сплавного транзистора, характеристики которого изображены на рис. 8.6, при включении в схему с общей базой ошибочно поменяли местами выводы коллектора и эмиттера. Поясните, как при этом изменятся токи коллектора, эмиттера, базы, обратный ток коллекторного перехода и коэффициент передачи эмиттерного тока, и начертите примерный вид входных и выходных характеристик.

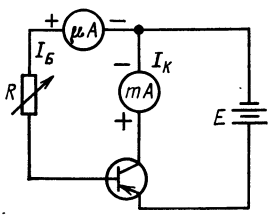


Рис. 8.7.

8.50. На рис. 8.7 изображена простейшая схема для измерения коэффициента передачи тока базы β. Напряжение источника питания $E = 3 \div 5$ В, сопротивление резистора $R = 100 \div 500$ кОм. Поясните, как, пользуясь этой схемой, можно примерно рассчитать β.

8.51. Приведите и поясните схемы для измерения обратных токов коллектора $I_{КБ0}$, эмиттера $I_{ЭБ0}$ и начального тока коллектора $I_{КЭК}$, если используются транзисторы: а) типа *p-n-p*; б) типа *n-p-n*.

8.52. Изобразите схемы для снятия вольт-амперных характеристик транзисторов типов *p-n-p* и *n-p-n* при включении в схему с общей базой. Покажите на них направления токов $I_Э$, $I_Б$, $I_К$ и полярности измерительных приборов.

8.53. На рис. 8.8,*а* и *б* изображены входные и выходные характеристики транзистора типа *n-p-n* в схеме с общим эмиттером. Покажите на характеристиках транзистора области, соответствующие активному режиму, режиму насыщения и режиму отсечки. Какие следует сделать изменения на рисунке, чтобы он соответствовал аналогичному транзистору типа *p-n-p*?

8.54. Транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы $\beta = 100$, обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0} = 5$ мкА, включен в схему с общим эмиттером. Определите: а) ток эмиттера $I_Э$; б) ток базы $I_Б$; в) коэффициент передачи тока эмиттера α; г) обратный ток коллектора $I_{КЭ0}$, если ток коллектора $I_К = 1$ мА.

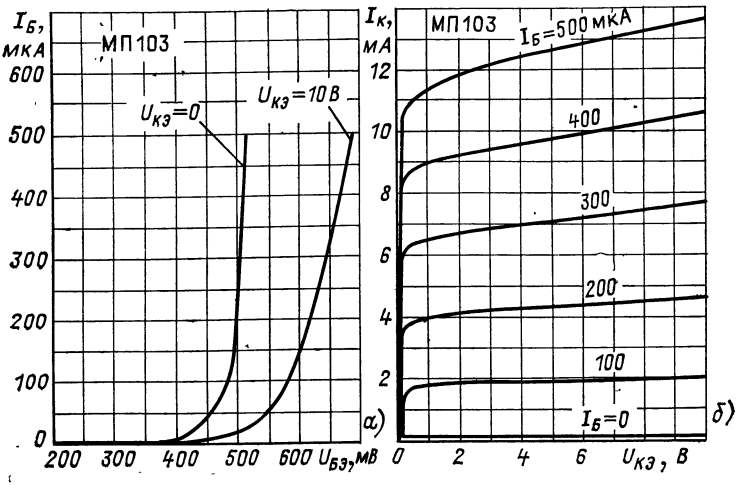
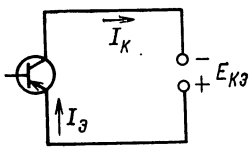


Рис. 8.8.

Рис. 8.9.



8.55. Сплавной транзистор типа *p-n-p* включен в схему, изображенную на рис. 8.9. Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора $\alpha = 0{,}98$ и обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0} = 10$ мкА.

Решение. Воспользуемся известным соотношением для токов транзистора в активном режиме: $I_К = \alpha I_Э + I_{КБ0}$. Поскольку цепь базы разорвана, то $I_К = I_Э$. Исключив из уравнения $I_Э$, получим

$$I_К = \alpha I_К + I_{КБ0} \text{ или } I_К(1 - \alpha) = I_{КБ0},$$

откуда

$$I_К = I_{КБ0}/(1-\alpha) = I_{КБ0}(1+\beta).$$

Этот ток обозначается символом $I_{КЭ0}$ и называется обратным током коллектор — эмиттер при разомкнутом выводе базы.

Подставляя числовые значения, данные в условии задачи, получаем:

$$I_{КЭ0} = 10/(1-0{,}98) = 500 \text{ мкА}.$$

Этот ток в $1+\beta$ раз больше обратного тока коллектора $I_{КБ0}$. Большое значение тока $I_{КЭ0}$ снижает устойчивость работы транзистора в схеме с общим эмиттером и может привести к тепловому пробою (см. задачу 8.171). Поэтому при эксплуатации транзисторов не допускается отключение

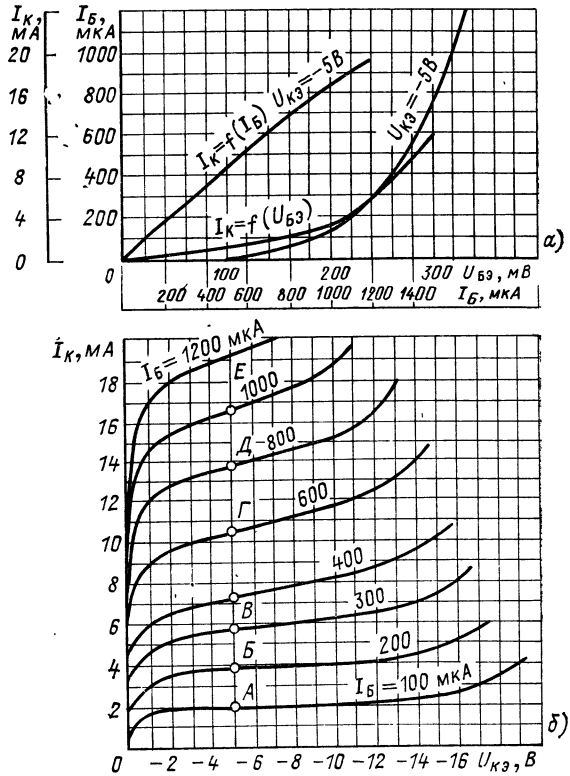


Рис. 8.10.

или разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах.

В этой задаче, кроме того, дан очень простой и точный способ измерения коэффициента передачи тока эмиттера α. Если вначале измерить обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0}$ (включая батарею между коллектором и базой), а затем измерить коллекторный ток, используя схему, изображенную на рис. 8.9, то можно непосредственно определить $1-\alpha$.

8.56. На рис. 8.10,*а* и *б* изображены входные и выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером. Требуется построить характеристику передачи тока $I_К = f(I_Б)$ при $U_{КЭ} = -5$ В $=$ const и характеристику передачи $I_К = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = -5$ В $=$ const.

Решение. Первая кривая—зависимость $I_К = f(I_Б)$ при $U_{КЭ} = -5$ В $=$ const строится по точкам *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*, которые являются точками пересечения вертикали для $U_{КЭ} = -5$ В с выходными характеристиками для разных токов базы $I_Б$. Эту кривую можно построить на графике входной характеристики, если по оси ординат отложить $I_К$, а по оси абсцисс $I_Б$ (рис. 8.10).

Вторая кривая строится с помощью имеющихся входной и выходной характеристик. Например, при напряжении коллектор—эмиттер $U_{КЭ} = -5$ В, ток базы $I_Б = 200$ мкА соответствует на входной характеристике напряжению $U_{БЭ} = -225$ мВ, а на выходной — току $I_К = 3{,}9$ мА. Поэтому в системе координат $I_К - U_{БЭ}$ наносим точку с этими координатами (3,9 мА; 225 мВ).

Аналогично находим другие точки, по которым строим кривую.

Для удобства можно составить таблицу (для $U_{КЭ} = -5$ В):

$I_Б$, мкА	100	200	300	400	600
$\lvert U_{БЭ}\rvert$, мВ	180	225	245	265	288
$I_К$, мА	2,0	3,9	5,7	7,4	10,5
Точки	*А*	*Б*	*В*	*Г*	*Д*

Из построенных характеристик передачи отчетливо видно, что кривая $I_К = f(I_Б)$ близка к линейной, а кривая $I_К = f(U_{БЭ})$ в нижней части резко нелинейна.

8.57. Пользуясь семействами входных и выходных характеристик транзистора МП103 для схемы с общим эмиттером (см. рис. 8.8,*а* и *б*), построить входные и выходные характеристики для схемы с общим коллектором.

8.58. Пользуясь семействами входных и выходных характеристик транзистора МП103 для схемы с общим эмиттером (см. рис. 8.8,*а* и *б*), построить входные и выходные характеристики этого транзистора для схемы с общей базой.

Транзистор как четырехполюсник

8.59. Изобразите схемы замещения транзистора в соответствии с указанными ниже уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = z_{11}\dot{I}_1 + z_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = z_{21}\dot{I}_1 + z_{22}\dot{I}_2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2. \end{cases}$$

8.60. Пользуясь схемой замещения транзистора с зависимым генератором тока, включенного по схеме с общей базой (рис. 8.11,*а*), установить зависимость между собственными параметрами и параметрами системы *h*.

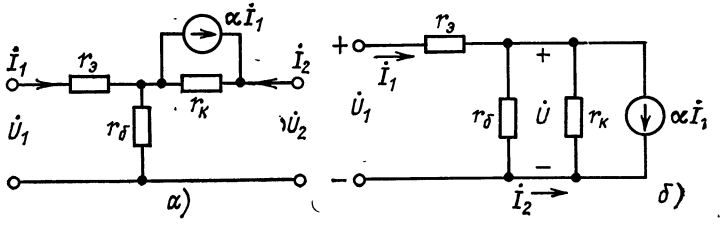


Рис. 8.11.

Решение. Параметры

$$h_{11б} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}\bigg|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{и} \quad h_{21б} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\bigg|_{\dot{U}_2=0}$$

определяются в режиме короткого замыкания на выходе для переменного тока. Поэтому для нахождения этих параметров преобразуем схему на рис. 8.11,*а* в схему, изображенную на рис. 8.11,*б*. Применив к этой схеме уравнения

Кирхгофа, найдем напряжение на входе

$$\dot{U}_1 = r_э \dot{I}_1 + \frac{(1-\alpha)\, I_1 r_б r_к}{r_б + r_к}.$$

Следовательно, входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменного тока

$$h_{11} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = r_э + \frac{(1-\alpha)\, r_б r_к}{r_б + r_к}.$$

Это точное выражение, которое можно упростить. Учитывая, что $r_к \gg r_б$, можно записать: $h_{11} \approx r_э + r_б(1-\alpha)$.

Из схемы на рис. 8.11,*б* видно, что

$$\dot{I}_2 + \alpha \dot{I}_1 = -\dot{U}/r_к, \quad \text{но} \quad \dot{U} = \frac{(1-\alpha)\, \dot{I}_1 r_к r_б}{r_б + r_к}.$$

Следовательно,

$$\dot{I}_2 = -\alpha \dot{I}_1 - \frac{(1-\alpha)\, \dot{I}_1 r_б}{r_б + r_к} = -\dot{I}_1 \left(\frac{\alpha r_б + \alpha r_к + r_б - \alpha r_б}{r_б + r_к} \right) =$$

$$= -\dot{I}_1 \left(\frac{\alpha r_к + r_б}{r_б + r_к} \right),$$

откуда

$$h_{21б} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \bigg|_{\dot{U}_2 = 0} = -\frac{r_б + \alpha r_к}{r_б + r_к}.$$

Разделив числитель и знаменатель почленно на $r_к$, получим

$$h_{21б} = -(r_б/r_к + \alpha)/(1 + r_б/r_к).$$

Поскольку $\alpha \approx 1$, $r_б/r_к \ll 1$, то $h_{21б} \approx -\alpha$.

Параметры $h_{12б}$ и $h_{22б}$ определяются в режиме холостого хода входной цепи для переменного тока (при разомкнутых входных зажимах). При этом зависимый генератор тока выключается. Нетрудно заметить, что в этом случае $h_{12б} = r_б/(r_б + r_к)$ и $h_{22б} = 1/(r_б + r_к)$.

8.61. Установить связь между z-параметрами и Y-параметрами транзистора.

Решение. Уравнения для системы z-параметров имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = z_{11} \dot{I}_1 + z_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = z_{12} \dot{I}_1 + z_{22} \dot{I}_2. \end{cases}$$

Уравнения для системы y-параметров имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2. \end{cases}$$

Переход от одной системы параметров к другой удобно осуществлять с помощью определителей.

Решая уравнения первой системы относительно $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, получаем:

$$\dot{I}_1 = \frac{\begin{vmatrix} \dot{U}_1 & z_{12} \\ \dot{U}_2 & z_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix}} = \frac{z_{22}\dot{U}_1 - z_{21}\dot{U}_2}{z_{11}z_{22} - z_{21}z_{12}} = \frac{z_{22}}{\Delta z}\dot{U}_1 - \frac{z_{12}}{\Delta z}\dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} z_{11} & \dot{U}_1 \\ z_{21} & \dot{U}_2 \end{vmatrix}}{\Delta z} = -\frac{z_{21}\dot{U}_1}{\Delta z} - \frac{z_{11}\dot{U}_2}{\Delta z},$$

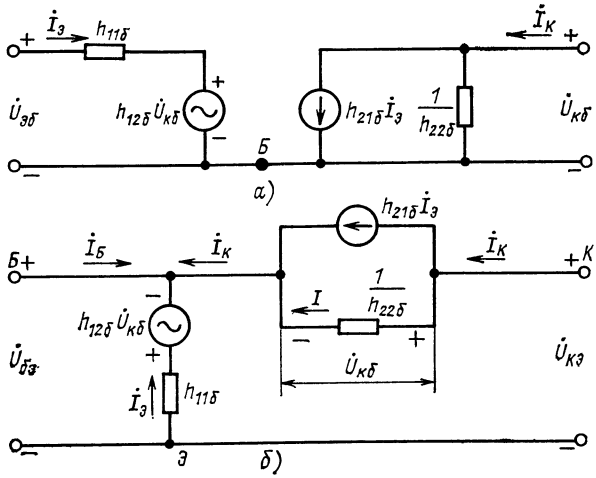


Рис. 8.12.

где $\Delta z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ — детерминант матрицы. Сопоставляя коэффициенты перед $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ уравнений второй системы с соответствующими коэффициентами уравнений первой системы, выведем искомые соотношения:

$$Y_{11} = z_{22}/\Delta z; \quad Y_{12} = -z_{12}/\Delta z; \quad Y_{21} = -z_{21}/\Delta z; \quad Y_{22} = z_{11}/\Delta z.$$

8.62. Установить связь между Y-параметрами и h-параметрами транзистора.

8.63. Выразить параметры транзистора $h_{12э}$ и $h_{11э}$ в схеме с общим эмиттером через h-параметры транзистора в схеме с общей базой.

Решение. Схема замещения транзистора с общей базой изображена на рис. 8.12,*а*. Если данный транзистор включить в схему с общим эмиттером, то схема замещения примет вид, показанный на рис. 8.12,*б*. По определению

$$h_{12э}=\frac{\dot{U}_{БЭ}}{\dot{U}_{КЭ}}\bigg|_{\dot{I}_Б=0}=\frac{-\dot{U}_{КБ}+\dot{U}_{КЭ}}{\dot{U}_{КЭ}}\bigg|_{\dot{I}_Б=0}=\left(1-\frac{\dot{U}_{КБ}}{\dot{U}_{КЭ}}\right)_{\dot{I}_Б=0};$$

если $\dot{I}_Б=0$, то $\dot{I}_К=-\dot{I}_Э$ и ток (рис. 8.12,*б*) $\dot{I}=-(1+h_{21б})\dot{I}_Э$. Поскольку $h_{22б}$ является проводимостью, то $\dot{I}=h_{22б}\dot{U}_{КБ}=-(1+h_{21б})\dot{I}_Э$.

Используя второй закон Кирхгофа, для выходного контура на рис. 8.12,*б* можно написать:

$$h_{11б}\dot{I}_Э+h_{21б}\dot{U}_{КБ}-\dot{U}_{КБ}+\dot{U}_{КЭ}=0.$$

Комбинируя два последних выражения, получаем:

$$-\frac{h_{11б}h_{22б}}{1+h_{21б}}\dot{U}_{КБ}+h_{21б}\dot{U}_{КБ}-\dot{U}_{КБ}+\dot{U}_{КЭ}=0,$$

или

$$\frac{\dot{U}_{КБ}}{\dot{U}_{КЭ}}=\frac{(1+h_{21б})}{h_{11б}h_{22б}+(1-h_{12б})\ (1+h_{21б})}.$$

Следовательно,

$$h_{12э}=1-\frac{\dot{U}_{КБ}}{\dot{U}_{КЭ}}=\frac{h_{11б}h_{22б}-(1+h_{21б})\ h_{12б}}{h_{11б}h_{22б}+(1-h_{12б})\ (1+h_{21б})}.$$

Поскольку $h_{12б}\ll 1$ и $h_{22б}h_{11б}\ll 1+h_{21б}$, эту формулу можно упростить:

$$h_{12э}\approx\frac{h_{11б}h_{22б}}{1+h_{21б}}-h_{12б}.$$

По определению $h_{11э}=\dot{U}_{БЭ}/\dot{I}_Б\big|_{\dot{U}_{КЭ}=0}$, т. е. этот параметр определяется в режиме короткого замыкания на выходе. Замкнув выходные зажимы в схеме на рис. 8.12,*б*, получим схему, изображенную на рис. 8.13. Отметим, что в этом случае $\dot{U}_{кб}=-\dot{U}_{бэ}$.

Применив второй закон Кирхгофа для входного контура, получим $\dot{U}_{кб}-h_{11б}\dot{I}_{э}-h_{12б}\dot{U}_{кб}=0$. Комбинируя два последних выражения, получаем:

$$\dot{I}_{э}=\frac{1-h_{21б}}{h_{11б}}\dot{U}_{кб}.$$

Применяя первый закон Кирхгофа для узла *Б*, получаем:

$$\dot{I}_{Б}+\dot{I}_{э}+h_{21б}\dot{I}_{э}-h_{22б}\dot{U}_{БЭ}=0,$$

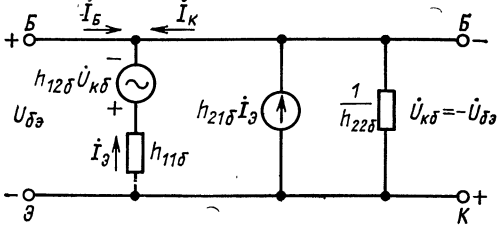


Рис. 8.13.

или

$$\dot{I}_{Б}=(1+h_{21б})\frac{1-h_{21б}}{h_{11б}}\dot{U}_{БЭ}+h_{22б}\dot{U}_{БЭ}.$$

Следовательно,

$$h_{11э}=\frac{\dot{U}_{БЭ}}{\dot{I}_{Б}}=\frac{h_{11б}}{h_{11б}h_{22б}+(1-h_{12б})(1+h_{21б})}.$$

Это точное выражение.

Поскольку $h_{12б}\ll 1$ и $h_{22б}h_{11б}\ll 1+h_{21б}$, то это выражение приводится к виду: $h_{11э}\approx h_{11б}/(1+h_{21б})$.

8.64. Покажите, что параметр $h_{21э}$ может быть выражен через h-параметры схемы с общей базой следующим образом:

$$h_{21э}=-\frac{h_{21б}(1-h_{12б})+h_{11б}h_{22б}}{(1+h_{21б})(1-h_{12б})+h_{22б}h_{11б}}.$$

Затем, сделав разумные допущения, из этой точной формулы получите приближенную:

$$h_{21э}\approx -h_{21б}/(1+h_{21б}).$$

8.65. Покажите, что параметр $h_{21б}$ связан с h-параметрами схемы с общим эмиттером следующей зависимостью:

$$h_{21б} = -\frac{h_{21э}(1-h_{12э}) + h_{11э}h_{22э}}{(1+h_{21э})(1-h_{12э}) + h_{22э}h_{11э}}.$$

Из этой точной формулы получите приближенную формулу:

$$h_{21б} \approx -h_{21э}/(1+h_{21э}).$$

8.66. Выведите соотношения, связывающие h-параметры схемы с общим коллектором с h-параметрами схемы с общей базой.

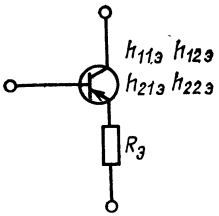


Рис. 8.14.

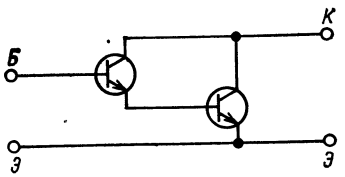


Рис. 8.15.

8.67. Выведите соотношения, связывающие h-параметры схемы с общим эмиттером с h-параметрами схемы с общим коллектором.

8.68. Ток эмиттера транзистора может быть описан следующим выражением: $\dot{I}_э = C\dot{U}_{КБ} + D\dot{I}_К$. Определить коэффициенты C и D через h-параметры транзистора.

8.69. Найти соотношения между параметрами проводимости Y_{11}, Y_{12}, Y_{21} и Y_{22} и параметрами Т-образной схемы замещения для схемы с общим эмиттером.

8.70. Выразите Y-параметры транзистора в схеме с общей базой через Y-параметры в схеме с общим эмиттером.

8.71. Покажите, что h-параметры схемы, изображенной на рис. 8.14, имеют вид:

$$h'_{11э} \approx h_{11э} + (1+h_{21э})R_э/(1+h_{22э}R_э);$$

$$h'_{12э} = (h_{12э} + h_{22э}R_э)/(1+h_{22э}R_э);$$

$$h'_{21э} = (h_{21э} - h_{22э}R_э)/(1+h_{22э}R_э);$$

$$h'_{22э} = h_{22э}/(1+h_{22э}R_э),$$

где символами h' обозначены параметры схемы, а символами h — параметры транзистора. Как изменятся эти выражения, если $h_{22э}R_э \ll 1$?

8.72. Покажите, что h-параметры составного транзистора, изображенного на рис. 8.15, имеют вид:

$$h_{11э}=h_{11э1}+\frac{(1-h_{12э1})\ (1+h_{21э1})\ h_{11э2}}{1+h_{22э1}h_{11э2}};$$

$$h_{21э}=h_{21э1}+\frac{(h_{21э2}-h_{22э1}h_{11э2})\ (1+h_{21э1})}{1+h_{22э1}h_{11э2}};$$

$$h_{22э}=h_{22э2}+\frac{(1+h_{21э2})\ (1-h_{12э2})\ h_{22э1}}{1+h_{22э1}h_{11э2}};$$

$$h_{12э}=h_{12э2}+\frac{(h_{11э2}h_{22э1}+h_{12э1})\ (1-h_{12э2})}{1+h_{22э1}h_{11э2}}.$$

8.73. Используя формулы, данные в условии задачи 8.72, вычислите h-параметры составного транзистора, полагая, что в схеме на рис. 8.15 используются два одинаковых транзистора типа МП-41 (воспользоваться справочником, взять средние значения параметров).

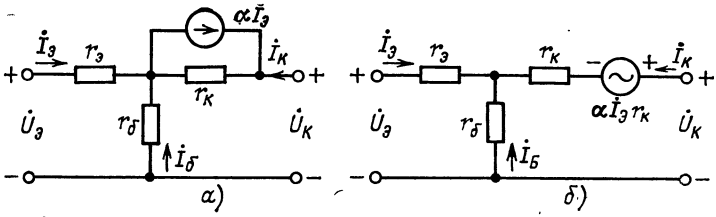


Рис. 8.16.

8.74. На рис. 8.16,*а* и *б* изображены Т-образные схемы замещения транзистора с генераторами тока и напряжения. Как изменялись бы эти схемы, если бы коллекторное напряжение не оказывало никакого действия на ток эмиттера, а влияло только на ток коллектора?

8.75. Какие из h-параметров транзистора изменят свое значение, если в схемах на рис. 8.16 увеличить сопротивление $r_б$? Поясните, увеличиваются или уменьшаются эти параметры в результате увеличения сопротивления базы.

8.76. Определить, являются ли совместимыми типовые значения параметров некоторого транзистора, включенного по схеме с общей базой: $h_{11б}=30$ Ом; $h_{12б}=4\cdot10^{-3}$; $h_{21б}=-0{,}97$; $h_{22б}=1\cdot10^{-6}$ См. Параметры заданы для рабочей точки: $U_{КБ}=-5$ В; $I_э=1$ мА.

Решение. Необходимость предварительной проверки совместимости всех четырех h-параметров вызвана тем, что они характеризуют один и тот же транзистор и поэтому

между ними существуют вполне определенные соотношения. В справочниках же даются усредненные значения параметров, которые могут этим соотношениям не удовлетворять. Иначе говоря, приняв для расчета приводимые в справочниках типовые значения параметров, можно получить абсурдные результаты.

Проверку совместимости параметров транзистора производят, вычисляя с помощью этих параметров значения сопротивлений Т-образной схемы замещения. В качестве критерия совместимости принимают положение о том, что все три сопротивления Т-образной схемы замещения с одним зависимым генератором должны быть положительны.

Найдем собственные параметры транзистора по формулам:

$$\alpha = -h_{21б} = 0{,}97;$$

$$r_б \approx \frac{h_{12б}}{h_{22б}} = \frac{4\cdot 10^{-3}}{1\cdot 10^{-3}} = 4000 \text{ Ом};$$

$$r_э = h_{11б} - h_{12б}\frac{(1+h_{21б})}{h_{22б}} = h_{11б} - r_б(1-\alpha) =$$

$$= 30 - 4000(1-0{,}97) = -90 \text{ Ом};$$

$$r_к = \frac{1}{h_{22}} - r_б \approx \frac{1}{h_{22}} = \frac{1}{10^{-6}} = 1 \text{ МОм}.$$

Поскольку значение параметра $r_э$ получилось отрицательным, приведенные в условии задачи значения параметров являются несовместимыми. Отрицательное значение сопротивления $r_э$ обусловлено слишком большим значением $r_б$, а последнее — большим значением параметра $h_{12б}$.

При несовместимости параметров в качестве исходных данных при расчете принимают три каких-либо h-параметра из четырех, имеющихся в справочнике, а четвертый определяют с учетом выбранных значений трех остальных, задавшись дополнительно значением одного из сопротивлений схемы замещения транзистора. Например, в рассматриваемом случае принимаем $h_{11б}$=30 Ом; $h_{21б}$=—0,97; $h_{22б}$=1 мкСм и полагаем, что значение сопротивления эмиттера $r_э$ в схеме замещения транзистора при $U_{КБ}$ = — 5 В и $I_э$ = 1 мА составляет 26 Ом.

Полагая $r_э$=26 Ом и $\alpha = |h_{21б}|$, находим $r_б$ по формуле

$$r_б = \frac{h_{11} - r_э}{1 - |h_{21б}|} = \frac{30-26}{1-0{,}97} = 133 \text{ Ом}.$$

Теперь находим параметр h_{12} по формуле $h_{12} = r_б h_{22} = 133\cdot 10^{-6} = 0{,}133\cdot 10^{-3}$.

8.77. По значениям h-параметров, приведенных в справочнике, начертите Т-образную схему замещения транзистора МП101 и определите собственные параметры транзистора (сопротивление эмиттера $r_э$, сопротивление базы $r_б$, сопротивление коллектора $r_к$ и коэффициенты передачи тока α и β).

8.78. Транзистор характеризуется следующими значениями собственных параметров: сопротивление эмиттера $r_э$=30 Ом, сопротивление базы $r_б$=500 Ом, сопротивление коллектора $r_к$=0,25 МОм, α=0,95. Найти значения z-параметров транзистора в схеме с общей базой.

8.79. Транзистор, включенный по схеме с общей базой, имеет следующие параметры: $h_{11б}$=50 Ом; $h_{12б}=6{,}1\cdot10^{-4}$; $h_{21б}$=—0,96; $h_{22б}$=0,5 мкСм.

Найти h-, Y- и z-параметры этого транзистора: а) в схеме с общим коллектором; б) в схеме с общим эмиттером.

8.80. Транзистор, включенный в схему с общей базой, имеет следующие значения z-параметров: z_{11}=700 Ом; z_{12}=500 Ом; z_{21}=80 кОм; z_{22}=100 кОм. Определить: а) собственные параметры транзистора в Т-образной схеме замещения ($r_э$, $r_б$, $r_к$ и α); б) Y-параметры.

8.81. У транзистора П416 в схеме с общей базой коэффициент передачи тока $h_{21б}$=—0,99, выходная проводимость $h_{22б}$=0,8 мкСм. Определить собственные параметры транзистора: сопротивление коллектора $r_к$ и коэффициент передачи тока эмиттера α.

8.82. Определить Y-параметры транзистора МП102, включенного по схеме с общей базой, если его h-параметры для этой же схемы включения в рабочей точке равны: $h_{11б}$=60 Ом; $h_{12б}=0{,}5\cdot10^{-3}$; $h_{21б}$=—0,96; $h_{22б}$=1 мкСм.

8.83. Определить h-параметры транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, если его Y-параметры в выбранной рабочей точке при включении по схеме с общей базой равны: $Y_{11б}$=294 000 мкСм; $Y_{12б}$=—7,35 мкСм; $Y_{21б}$=—27 200 мкСм; $Y_{22б}$=7,8 мкСм.

8.84. Транзистор имеет следующие параметры: $h_{11б}$=35 Ом; $h_{22б}$=1 мкСм; $h_{12б}=2{,}5\cdot10^{-4}$; $h_{21э}$=110. Определить параметры $h_{11э}$, $h_{22э}$, $h_{12э}$, $h_{21б}$.

8.85. Транзистор имеет следующие значения h-параметров: $h_{21э}$=60; $h_{22б}$=0,8 мкСм; $h_{11б}$=20 Ом; $h_{12б}=5\cdot10^{-4}$. Определить собственные параметры в Т-образных схемах замещения для транзистора, включенного по схеме с общей базой и общим эмиттером.

8.86. Докажите, что соотношения между параметрами системы z и собственными параметрами транзистора имеют вид: $z_{11}=r_э+r_б$; $z_{12}=r_б$; $z_{21}=r_б+\alpha r_к$; $z_{22}=r_к+r_б$.

8.87. Транзистор МП101А, включенный в схему с общей базой, имеет следующие значения h-параметров: $h_{11б}$=60 Ом; $h_{12б}=0{,}5\cdot10^{-3}$; $h_{21б}=-0{,}93$; $h_{22б}$=1 мкСм. Определить Y-параметры этого транзистора в схемах с общими базой, эмиттером и коллектором.

8.88. Для транзистора МП14, включенного по схеме с общей базой, в рабочей точке были экспериментально определены следующие параметры: $h_{11б}$=22 Ом; $h_{12б}=1{,}5\cdot10^{-4}$; $h_{21б}=-0{,}973$; $h_{22б}$=0,6 мкСм. Определить Y-параметры этого транзистора в схеме включения с общим эмиттером.

8.89. Типичные значения параметров для некоторого транзистора следующие: $h_{11б}$=20 Ом; $h_{12б}=2\cdot10^{-4}$; $h_{21э}$=28; $h_{22б}=0{,}4\cdot10^{-5}$ См. Определить значения всех трех сопротивлений Т-образной схемы замещения.

8.90. Транзистор характеризуется следующими значениями собственных параметров: сопротивление эмиттера $r_э$=15 Ом, сопротивление базы $r_б$=500 Ом, сопротивление коллектора $r_к$=1 МОм, коэффициент передачи тока эмиттера α=0,96. Определить все четыре h-параметра для схемы включения с общим эмиттером.

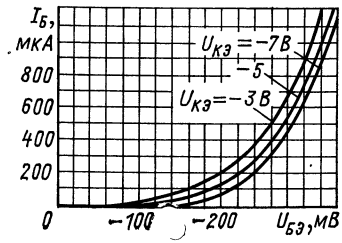


Рис. 8.17.

8.91. Транзистор характеризуется следующими значениями собственных параметров: сопротивление эмиттера $r_э$=15 Ом; сопротивление базы $r_б$=1500 Ом; сопротивление коллектора $r_к$=1,8 МОм; коэффициент передачи тока эмиттера α=0,98. Определить все четыре h-параметра для схемы включения с общим коллектором.

8.92. Транзистор МП102, включенный в схему с общей базой, имеет следующие значения h-параметров: входное сопротивление $h_{11б}$=60 Ом; коэффициент обратной связи по напряжению $h_{12б}=0{,}5\cdot10^{-3}$; коэффициент передачи тока $h_{21б}=-0{,}96$; входная проводимость $h_{22б}$=1 мкСм. Определить собственные параметры Т-образной схемы замещения с генератором напряжения.

8.93. По входным характеристикам транзистора в схеме с общим эмиттером (рис. 8.17) в рабочей точке с напряжением база — эмиттер $U_{БЭ}=-300$ мВ и напряжением коллектор — эмиттер $U_{КЭ}=-5$ В определить параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$.

8.94. Как изменится положение входных характеристик транзистора, рассмотренного в предыдущей задаче, если параметр $h_{11э}$ будет больше, чем в случае, которому соответствует рисунок?

8.95. О каких h-параметрах транзистора в схеме с общим эмиттером можно судить: а) по расстоянию между выходными характеристиками; б) по наклону выходных характеристик? Пользуясь справочником, вычислите эти параметры для транзистора МП41 в рабочей точке с напряжением коллектор — эмиттер $U_{КЭ} = -8$ В и током базы $I_Б = 800$ мкА.

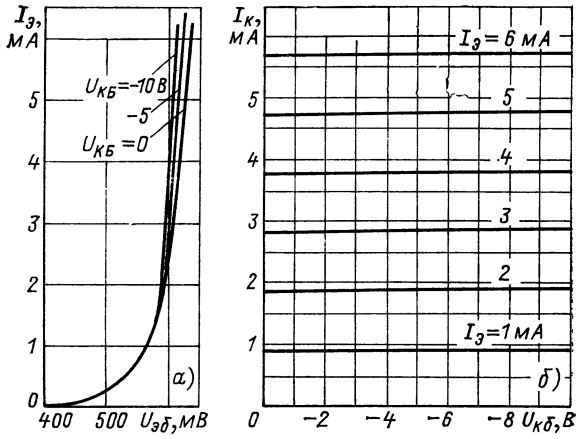


Рис. 8.18.

8.96. На рис. 8.18,*а* приведены входные характеристики транзистора в схеме с общей базой. Как изменится положение кривых на графике, если бы параметр $h_{12б}$ был равен нулю?

8.97. По входным характеристикам транзистора в схеме с общей базой (рис. 8.18,*а*) в рабочей точке с напряжением эмиттер — база $U_{ЭБ} = 0{,}62$ В и напряжением коллектор — база $U_{КБ} = -5$ В определить параметры $h_{11б}$ и $h_{12б}$.

8.98. По выходным характеристикам транзистора в схеме с общим эмиттером (рис. 8.8,*б*) в рабочей точке с напряжением коллектор — эмиттер $U_{КЭ} = -5$ В и током базы $I_Б = 300$ мкА определить параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$.

8.99. По выходным характеристикам транзистора в схеме с общей базой (рис. 8.18,*б*) в рабочей точке с напряжением коллектор—база $U_{КБ} = -6$ В и током эмиттера $I_Э = 3$ мА определить параметры $h_{21б}$, $h_{22б}$.

8.100. На рис. 8.8,*б* представлены выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером. Как изменится вид кривых, если параметр $h_{21э}$ будет меньше, чем в случае, которому соответствует рисунок?

8.101. Как изменился бы вид выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером и в схеме с общей базой (см. рис. 8.8,*б* и 8.18,*б*), если бы параметр h_{22} равнялся нулю?

8.102. Пользуясь выходными характеристиками транзистора МП302 в схеме с общим эмиттером (рис. 8.19), построить график зависимости коэффициента передачи тока базы в режиме короткого замыкания выходной цепи от коллекторного тока $h_{21э} = f(I_К)$ при неизменном напряжении коллектор — эмиттер $U_{КЭ} = -30$ В.

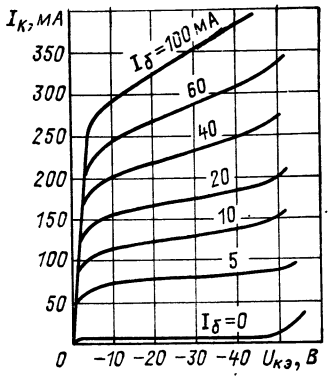


Рис. 8.19.

8.103. Пользуясь выходными характеристиками транзистора П302 в схеме с общим эмиттером (рис. 8.19), построить график зависимости $h_{21э} = f(U_{КЭ})$ при неизменном токе базы $I_Б = 40$ мА.

8.104. Пользуясь семейством входных и выходных характеристик транзистора МП103 (см. рис. 8.18), определить его сопротивления: эмиттера $r_э$, коллектора $r_к$ и базы $r_б$.

8.105. Транзистор, включенный в схему с общим эмиттером, имеет следующие параметры: $h_{11э}=2$ кОм; $h_{12э}=6\cdot10^{-4}$; $h_{21э}=50$; $h_{22э}=25$ мкСм. Определить h-параметры этого транзистора, включенного в схему с общей базой.

8.106. Транзистор в Т-образной схеме замещения с генератором тока имеет следующие параметры: $r_э=15$ Ом; $r_б=250$ Ом; $r_к=1$ МОм; $\alpha=0{,}925$. Определить h-параметры четырехполюсника, эквивалентного транзистору, включенному по схеме с общей базой.

8.107. Определить коэффициенты передачи тока для всех трех схем включения транзистора, если амплитуда пере-

менной составляющей коллекторного тока I_{mK}=3,9 мА, а амплитуда тока эмиттера $I_{mЭ}$=4 мА.

8.108. Коэффициент передачи тока в схеме с общим коллектором может быть примерно определен как β/α. Выразить этот коэффициент только как функцию α или только как функцию β.

8.109. В схеме усилителя с общей базой транзистор имеет коэффициент передачи тока эмиттера α=0,98. Определить коэффициенты передачи тока этого транзистора при включении его в схемы: а) с общим эмиттером; б) с общим коллектором.

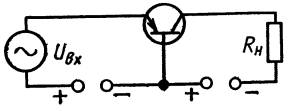


Рис. 8.20.

8.110. Почему усилитель, изображенный на рис. 8.20, усиливает только от входа к выходу и не может усиливать в обратном направлении?

РАБОЧИЙ РЕЖИМ ТРАНЗИСТОРА

Аналитический расчет рабочего режима

8.111. В цепи на рис. 8.21 E_K=−10 В, $R_н$=2 кОм, $R_э$=1 кОм. Определить входное сопротивление цепи, если коэффициент передачи тока базы транзистора β=50.

Решение. Входное сопротивление $R_{вх}=\dot{U}_Б/\dot{I}_Б$. Поскольку ввиду малости можно пренебречь падением напряжения на эмиттерном переходе, то $\dot{U}_Б \approx -\dot{I}_Э R_Э$, а $\dot{I}_Э = -\dot{I}_Б(\beta+1)$. Следовательно, $R_{вх}=\dot{I}_Б(\beta+1)R_э/\dot{I}_Б=1(50+1)=51$ кОм. Это примерное значение входного сопро-

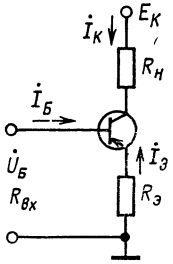


Рис. 8.21.

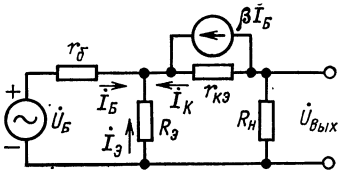


Рис. 8.22.

тивления получено без учета сопротивления эмиттера $r_э$ и сопротивления базы $r_б$. Если учесть эти сопротивления, то формула для входного сопротивления будет иметь вид: $R_{вх}=(r_э+R_э)(\beta+1)+r_б$. На практике $r_э \ll R_э$ и $r_б \ll R_э(\beta+1)$, поэтому приближенно можно считать, что $R_{вх} \approx R_э(\beta+1)$.

В данном анализе не было учтено также влияние сопротивления $r_{кэ}$. Схема замещения для учета этого влияния показана на рис. 8.22.

Предположим, что $r_{кэ}=\infty$ и генератор тока $\beta\dot{I}_Б$ отсутствует. Тогда ток коллектора $\dot{I}_К$ равен нулю, и входной ток базы $\dot{I}_Б$ определяется только $r_б$ и $R_э$. В таком случае $R_{вх}=r_б+R_э$.

Теперь допустим, что сопротивление $r_{кэ}$ бесконечно, но имеется генератор тока $\beta\dot{I}_Б$. Следовательно, источник $\dot{U}_Б$ вызывает ток $\dot{I}_Б$, а источник $\beta\dot{I}_Б$ будет вызывать ток коллектора $\dot{I}_К=\beta\dot{I}_Б$.

Эти токи вызывают на сопротивлении $R_э$ падение напряжения $R_э(\dot{I}_Б+\beta\dot{I}_Б)$ Из анализа схемы следует, что

$$\dot{I}_Б=\frac{\dot{U}_Б-R_э(\beta+1)\dot{I}_Б}{r_б}.$$

Решив это уравнение относительно $\dot{I}_Б$, получим:

$$\dot{I}_Б=\frac{\dot{U}_Б}{r_б+R_э(\beta+1)}.$$

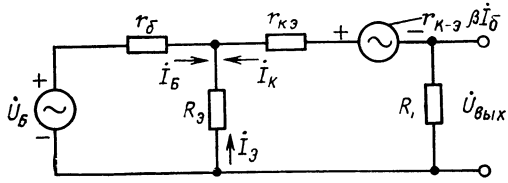


Рис. 8.23.

Тогда входное сопротивление

$$R_{вх}=\dot{U}_Б/\dot{I}_Б=r_б+R_э(\beta+1).$$

Будем считать, что $r_{кэ}$ конечно. При уменьшении $r_{кэ}$ все большая часть тока $\beta\dot{I}_Б$ будет проходить через это сопротивление, вместо того чтобы идти к коллекторным выводам и создавать ток коллектора. Следовательно, падение на-

пряжения на $R_э$ будет меньше, и входное сопротивление будет уменьшаться. Произведем математический анализ этого явления, заменив в схеме на рис. 8.22 генератор тока генератором напряжения. Используя метод эквивалентного генератора, получим схему, показанную на рис. 8.23.

Для каждого из контуров можно записать:

$$\dot{U}_Б = (r_б + R_э)\dot{I}_Б + R_э\dot{I}_К;$$

$$0 = (R_э - \beta r_{кэ})\dot{I}_Б + (R_э + r_{кэ} + R_н)\dot{I}_К.$$

Решим эти уравнения относительно $\dot{I}_Б$:

$$\dot{I}_Б = \frac{\begin{vmatrix} \dot{U}_Б & R_э \\ 0 & R_э + r_{кэ} + R_н \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} r_б + R_э & R_э \\ R_э - \beta r_{кэ} & R_э + r_{кэ} + R_н \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{\dot{U}_Б (R_э + r_{кэ} + R_н)}{(r_б + R_э)(R_э + r_{кэ} + R_н) - R_э (R_э - \beta r_{кэ})}.$$

Преобразуем знаменатель дроби:

$$r_б (R_э + r_{кэ} + R_н) + R^2_э + R_э r_{кэ} + R_э R_н - R^2_э + R_э \beta r_{кэ}$$

или

$$r_б (R_э + r_{кэ} + R_н) + R_э [r_{кэ} (\beta + 1) + R_н].$$

Если числитель и знаменатель уравнения для $\dot{I}_Б$ разделить на $R_э + r_{кэ} + R_н$, то можно переписать это уравнение в виде $\dot{I}_Б = \dot{U}_Б / R_{вх}$, где $R_{вх}$ — входное сопротивление. Следовательно, входное сопротивление

$$R_{вх} = r_б + \frac{R_э [r_{кэ} (\beta + 1) + R_н]}{R_э + r_{кэ} + R_н}.$$

Разделив числитель и знаменатель на $r_{кэ}$, получим:

$$R_{вх} = r_б + \frac{R_э [(\beta + 1) + R_н / r_{кэ}]}{1 + (R_э + R_н)/r_{кэ}}.$$

Получили точное выражение для входного сопротивления. Из этого выражения можно выяснить роль сопротивления $r_{кэ}$. Если $(R_э + R_н)/r_{кэ} \ll 1$, то $R_н / r_{кэ} \ll 1$, и тогда уравнение принимает вид $R_{вх} = r_б + R_э (\beta + 1)$.

8.112. Покажите, что входное сопротивление $R_{вх}$ в схеме на рис. 8.24 примерно равно $r_э + R_б (1 - \alpha)$, где $r_э$ — сопротивление эмиттера.

8.113. Дана схема, изображенная на рис. 8.25. Известно, что транзистор работает в активном режиме. Предполагая, что сопротивление резистора $R_э$ достаточно велико по срав-

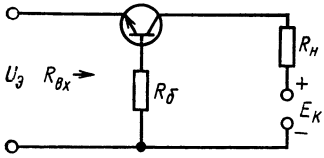


Рис. 8.24.

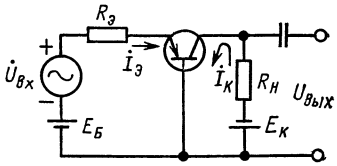


Рис. 8.25.

нению с сопротивлением эмиттерного перехода и что сопротивление коллекторного перехода $r_к \gg R_н$, найти коэффициент усиления по напряжению K_U. Пренебречь обратным током коллектора $I_{КБ0}$.

Решение. Выходное напряжение

$$\dot{U}_{вых} = -\dot{I}_К R_н.$$

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно написать:

$$\dot{I}_э = \dot{U}_{вх}/R_э.$$

Пренебрегая обратным током коллектора $I_{КБ0}$, найдем ток коллектора

$$\dot{I}_К \approx -\alpha \dot{I}_э.$$

Следовательно,

$$\dot{U}_{вых} = \alpha \dot{I}_э R_н = \alpha \dot{U}_{вх} R_н / R_э.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \dot{U}_{вых}/\dot{U}_{вх} = \alpha R_н / R_э.$$

8.114. В схеме на рис. 8.26 $R_э$=0,5 кОм, $R_б$=50 кОм, $R_н$=2 кОм, $E_э$ =2 В, $E_К$=15 В. Транзистор имеет коэффициент передачи тока базы β=100. Обратным током коллекторного перехода $I_{КБ0}$ пренебречь. Положить сопротивление коллектора $r_к \to \infty$. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, пренебрегая сопротивлением емкости.

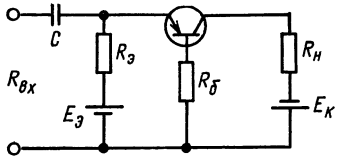


Рис. 8.26.

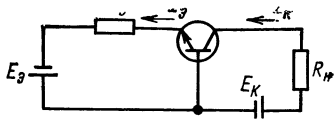


Рис. 8.27.

8.115. В схеме на рис. 8.27 $R_э = 5$ кОм, $R_н = 10$ кОм, $E_э = 10$ В, $E_К = 30$ В. Определить напряжение коллектор — база $U_{КБ}$.

Решение. Значения коэффициента передачи тока эмиттера α и обратного тока коллектора умышленно не даны, чтобы читатели привыкали делать самостоятельно допустимые приближения. Если температура, при которой работает транзистор, невелика, то можно считать, что $I_{КБ0} \approx 0$. Коэффициент передачи тока эмиттера α принимаем равным единице.

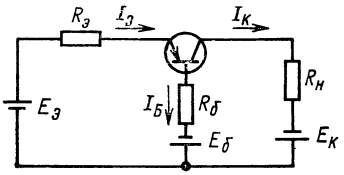


Рис. 8.28.

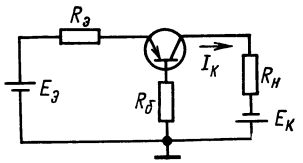


Рис. 8.29.

Тогда, пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно записать $I_э = E_э/R_э = 10/(5 \cdot 10^3) = 2$ мА, а ток коллектора $I_К \approx \alpha I_э \approx I_э = 2$ мА. Следовательно,

$$U_{КБ} = E_К - I_К R_н = 30 - 2 \cdot 10 = 10 \text{ В}.$$

8.116. В схеме, изображенной на рис. 8.27, $R_э = 0{,}5$ кОм, $E_э = 1$ В, $R_н = 5$ кОм, $E_К = 15$ В. Транзистор имеет $\alpha = 0{,}99$ и $I_{КБ0} \approx 0$. Определить ток коллектора $I_К$, напряжение коллектор — база $U_{КБ}$.

8.117. В схеме на рис. 8.28 $E_э = 2$ В, $R_э = 2$ кОм, $R_б = 15$ кОм, $E_Б = 3$ В, $R_н = 4$ кОм, $E_К = 16$ В. Транзистор имеет $\alpha = 0{,}98$; $I_{КБ0} = 10$ мкА.

Определить ток коллектора.

Решение. Используя второй закон Кирхгофа для входной цепи (эмиттер — база), запишем:

$$E_э + E_Б = I_э R_э + I_Б R_б.$$

Но ток базы

$$I_Б = I_э (1 - \alpha) - I_{КБ0},$$

следовательно,

$$E_э + E_Б = I_э R_э + [I_э (1 - \alpha) - I_{КБ0}] R_б,$$

откуда

$$I_э = \frac{E_э + E_Б + I_{КБ0}R_б}{R_э + R_б(1-\alpha)} = \frac{2+3+0{,}01\cdot 15}{2+15(1-0{,}98)} = 2{,}4 \text{ мА}.$$

Найдем ток коллектора:

$$I_К = \alpha I_э + I_{КБ0} = 0{,}98\cdot 2{,}4\cdot 10^{-3} + 10\cdot 10^{-6} \approx 2{,}36 \text{ мА}.$$

8.118. Дана схема (рис. 8.29), в которой $R_э = 500$ Ом, $E_э = 2$ В, $R_б = 25$ кОм, $R_н = 4$ кОм, $E_К = 16$ В. Транзистор имеет $\alpha = 0{,}98$, $I_{КБ0} = 0$. Определить ток коллектора $I_К$ и напряжение коллектор — база $U_{КБ}$.

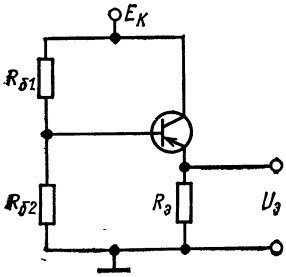


Рис. 8.30.

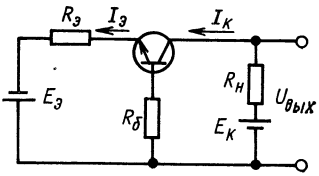


Рис. 8.31.

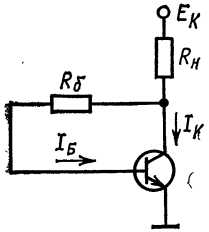


Рис. 8.32.

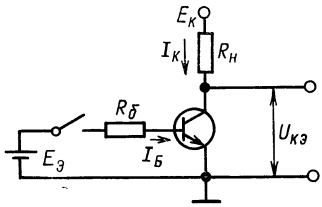


Рис. 8.33.

8.119. В схеме на рис. 8.30 $R_{б1} = 60$ кОм, $R_{б2} = 30$ кОм, $R_э = 0{,}5$ кОм, $E_К = -30$ В. Используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 19$. Определить напряжение $U_э$.

8.120. Дана схема (рис. 8.31), в которой $R_э = 2$ кОм, $R_б = 50$ кОм, $R_н = 5$ кОм, $E_э = 6$ В, $E_К = 20$ В. Транзистор имеет следующие параметры: $I_{КБ0} \approx 0$; $\alpha = 0{,}98$; $r_к \to \infty$. Определить $U_{вых}$.

Решение. Найдем входное сопротивление: $R_{вх}=R_э+R_б(1-\alpha)=2\cdot10^3+50\cdot10^3(1-0{,}98)=3$ кОм. Таким образом, $I_э\approx E_э/R_{вх}=6/3\cdot10^3=2$ мА. Поскольку $\alpha\approx1$, то $I_К=\alpha I_э\approx I_э=2$ мА. Следовательно, $U_{вых}=E_К-R_нI_К=20-5\cdot2=10$ В.

8.121. Дана схема, изображенная на рис. 8.32. Докажите, что ток коллектора в этой схеме может быть вычислен по следующей приближенной формуле:

$$I_К\approx\frac{\beta(E_К+I_{КБ0}R_б)}{R_б+\beta R_н}.$$

Решение. $I_К=\beta I_Б+I_{КБ0}(\beta+1)$; $U_{КЭ}\approx I_БR_б$; $U_{КЭ}=E_К-(I_Б+I_К)R_н$.

Из двух последних выражений получим:

$$I_БR_б=E_К-(I_Б+I_К)R_н,$$

откуда

$$I_Б=\frac{E_К-I_КR_н}{R_б+R_н}.$$

Подставив это уравнение в выражение для $I_К$, получим:

$$I_К=\beta\frac{E_К-I_КR_н}{R_б+R_н}+I_{КБ0}(\beta+1),$$

откуда

$$I_К=\frac{\beta E_К+I_{КБ0}(\beta+1)(R_б+R_н)}{R_б+R_н(\beta+1)}.$$

Учитывая, что $\beta\gg1$ и что $\beta+1\approx\beta$, получаем:

$$I_К\approx\beta\frac{E_К+I_{КБ0}(R_б+R_н)}{R_б+\beta R_н}.$$

Так как обычно $R_б\gg R_н$, то

$$I_К\approx\beta\frac{E_К+I_{КБ0}R_б}{R_б+\beta R_н}.$$

8.122. В схеме на рис. 8.33 используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta=50$ и обратным током коллекторного перехода $I_{КБ0}=10$ мкА. В этой цепи $R_б=10$ кОм, $E_э=1$ В, $R_н=5$ кОм, $E_К=20$ В. Определить напряжение коллектор — эмиттер при разомкнутом и замкнутом ключе.

Решение. При разомкнутом ключе ток базы $I_Б=0$, и в идеальном транзисторе ток коллектора $I_К=\beta I_Б+$ $+I_{КБ0}(\beta+1)=10\cdot10^{-6}\cdot51=0{,}51$ мА; $U_{КЭ}=E_К-I_К R_н=$ $=20-0{,}51\cdot5=17{,}5$ В.

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, находим ток базы при замкнутом ключе:

$$I_Б\approx E_Э/R_б=1/(10\cdot10^3)=100 \text{ мкА}.$$

Если считать, что сохраняется активный режим, то ток коллектора

$$I_К=\beta I_Б+I_{КБ0}(1+\beta)=50\cdot10^{-4}+51\cdot10^{-5}=5{,}51 \text{ мА},$$

и напряжение коллектор — эмиттер

$$U_{КЭ}=E_К-I_К R_н=20-5{,}51\cdot10^{-3}\cdot5\cdot10^3=-7{,}5 \text{ В}.$$

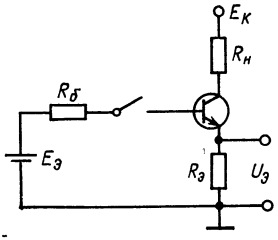


Рис. 8.34.

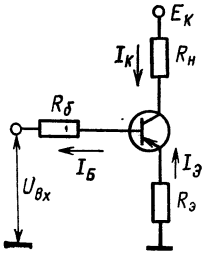


Рис. 8.35.

Этот результат означает, что транзистор работает в режиме насыщения, так как на эмиттерном и на коллекторном переходах получаются прямые напряжения. Но в режиме насыщения ток коллектора не может быть больше тока $I_{Кmax}\approx E_К/R_н=4$ мА. При этом напряжении коллектор — эмиттер $U_{КЭ}\approx0$. Таким образом, при замкнутом ключе $U_{КЭ}\approx0$.

8.123. В схеме на рис. 8.34 используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta=19$. Данные схемы: $R_б=10$ кОм, $R_э=0{,}5$ кОм, $R_н=5$ кОм, $E_Э=2$ В, $E_К=$ $=15$ В. Определить напряжение $U_Э$ при разомкнутом и замкнутом ключе (током $I_{КБ0}$ пренебречь).

8.124. Транзистор используется в схеме, показанной на рис. 8.35. Данные схемы: $E_К=-28$ В, $R_б=15$ кОм, $R_э=$ $=1$ кОм, $R_н=2$ кОм. Определить, при каком минимальном

входном напряжении транзистор будет работать в режиме насыщения. Принять, что на границе режима насыщения $\beta=9$.

Решение. В режиме насыщения напряжение $U_{КЭ} \approx 0$. Входное напряжение

$$U_{вх} = -I_Э R_э - I_Б R_б;$$

напряжение коллекторного источника

$$E_К = -I_Э R_э - I_К R_н;$$

ток эмиттера

$$I_Э \approx I_Б(\beta+1);$$

ток коллектора

$$I_К \approx I_Б \beta.$$

Следовательно, входное напряжение

$$U_{вх} = -[I_Б(\beta+1)R_э + I_Б R_б] = -I_Б[R_э(\beta+1)+R_б];$$

напряжение источника

$$E_К = -I_Б(\beta+1)R_э + I_Б \beta R_н = -I_Б[R_э(\beta+1)+\beta R_н],$$

откуда ток базы

$$I_Б = \frac{-E_К}{R_э(\beta+1)+\beta R_н} = \frac{28}{10^3(9+1)+9\cdot 2\cdot 10^3} = 1 \text{ мА}.$$

Таким образом, окончательно получим: $U_{вх} = -1[1(9+1)+15] = -25$ В.

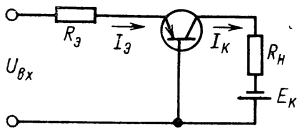


Рис. 8.36.

8.125. В схеме на рис. 8.36 используется транзистор с коэффициентом передачи тока эмиттера $\alpha=0{,}99$ и обратным током коллектора $I_{КБ0}=10$ мкА. Данные схемы: $R_э=3$ кОм, $R_н=2$ кОм, $E_К=20$ В. Определить, при каком минимальном значении входного напряжения транзистор будет работать в режиме насыщения.

Решение. Транзистор будет работать в режиме насыщения, если напряжение коллектор — база $U_{КБ}=0$. Напряжение

$$U_{КБ} = -E_К + I_К R_н.$$

Приравняв это напряжение нулю, найдем коллекторный ток:

$$I_К = E_К/R_н = 20/(2\cdot 10^3) = 10 \text{ мА}.$$

Из уравнения $I_К = \alpha I_Э + I_{КБ0}$ найдем

$$I_Э = (I_К - I_{КБ0})/\alpha = (10\cdot 10^{-3} - 10\cdot 10^{-6})/0{,}99 \approx 10 \text{ мА}.$$

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, найдем искомое

$$U_{вх} \approx I_Э R_Э = 10\cdot 10^{-3}\cdot 3\cdot 10^3 = 30 \text{ В}.$$

8.126. Известно, что в схеме, показанной на рис 8.37, ток базы $I_Б = 100$ мкА. Определить примерное значение коэффициента передачи тока базы β.

8.127. Чему равно подводимое напряжение $U_{вх}$ в схеме на рис. 8.38, если ток коллектора $I_К$=5 мА?

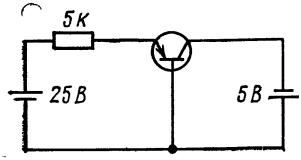


Рис. 8.37.

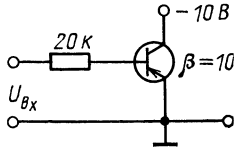


Рис. 8.38.

8.128. Покажите, что $R_{вх}$ цепи на рис. 8.39 примерно равно $R_Э\beta_1\beta_2$.

8.129. В схеме на рис. 8.40 $R_Э$=6 кОм; $R_н$=12 кОм; $E_К$=24 В. Определить напряжение коллектор — база $U_{КБ}$ для двух случаев: а) $U_{вх}$=6 В; б) $U_{вх}$=—6 В.

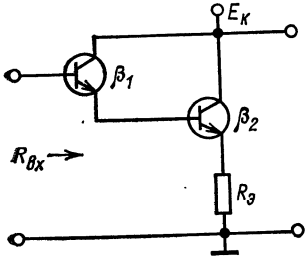


Рис. 8.39.

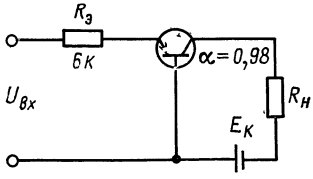


Рис. 8.40.

8.130. В схеме на рис. 8.41 ($E_Б$ =10 В, $E_К$=—30 В, $R_б$=100 кОм, $R_н$=10 кОм) используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы β=20. Определить напряжение коллектор — эмиттер $U_{КЭ}$.

8.131. Решить предыдущую задачу, если сопротивление резистора $R_б$=10 кОм.

8.132. Транзистор, имеющий коэффициент передачи тока эмиттера α=0,98, используется в схеме, изображенной на рис. 8.42. Данные схемы: $R_э$=10 кОм, $E_э$=10 В. Определить ток коллектора.

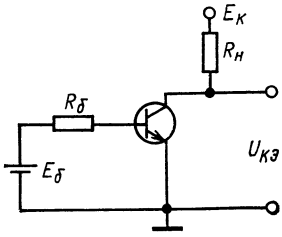


Рис. 8.41.

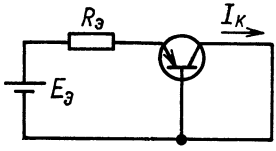


Рис. 8.42.

8.133. В схеме на рис. 8.44 ($R_б$=120 кОм, $R_н$=2 кОм, $E_К$=—12 В) используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы β=20. Определить напряжение коллектор — эмиттер.

8.134. В схеме на рис. 8.43 ($R_б$=50 кОм, $R_н$=10 кОм, $E_К$=24 В) используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы β=19. Определить напряжение коллектор — эмиттер.

Решение. Пренебрегая током $I_{КБ0}$, имеем:

$$U_{КЭ}=E_К-I_Э R_н=E_К-I_Б(\beta+1)R_н=$$
$$=E_К-U_{КЭ}(\beta+1)R_н/R_б,$$

откуда

$$U_{КЭ}=\frac{E_К}{1+(R_н/R_б)(\beta+1)}=\frac{24}{1+\left(\frac{10\cdot10^3}{50\cdot10^3}\right)(19+1)}=$$
$$=4{,}8\ \text{В}.$$

8.135. Транзистор используется в схеме на рис. 8.45. Найти коэффициент усиления по току $K_i=\Delta I_н/\Delta I_{вх}$.

Решение.

$$I_Б=I_{вх}+I_f; \quad (1)$$
$$I_н=I_f+I_К; \quad (2)$$
$$E_к=I_f R_f+I_н R_н; \quad (3)$$
$$I_К=\beta I_Б. \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим:

$$I_н = I_f + \beta I_Б. \qquad (5)$$

Перепишем (1), (5) и (3) в виде, удобном для решения с помощью определителей

$$I_{вх} = I_f - I_Б + 0; \qquad (1а)$$

$$0 = I_f + \beta I_Б - I_н; \qquad (5а)$$

$$E_к = R_f I_f + 0 + R_н I_н, \qquad (3а)$$

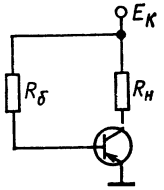


Рис. 8.43.

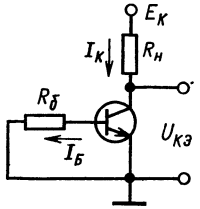


Рис. 8.44.

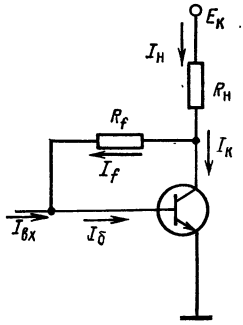


Рис. 8.45.

откуда

$$I_К = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -1 & -I_н \\ 1 & \beta & 0 \\ R_f & 0 & E_к \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & \beta & -1 \\ 1 & 0 & R_н \end{vmatrix}} = \frac{\beta E_к + \beta I_{вх} R_f + E_к}{\beta R_н + R_f + R_н} =$$

$$= \frac{E_к(\beta + 1) + \beta I_{вх} R_f}{R_f + R_н(\beta + 1)};$$

$$K_i = \frac{dI_н}{dI_{вх}} = \frac{\Delta I_н}{\Delta I_{вх}} = \frac{\beta R_f}{R_f + R_н(\beta + 1)} = \frac{\beta}{1 + R_н(\beta + 1)/R_f}.$$

Заметим, что когда $R_н(\beta+1)/R_f \gg 1$ и $\beta \gg 1$, $K_i = R_f/R_н$, т. е. не зависит от свойств транзистора. Причиной этого является отрицательная обратная связь, осуществляемая резистором R_f.

8.136. Т-образная схема замещения низкочастотного транзистора при работе в усилителе, собранном по схеме

с общей базой, показана на рис. 8.46. Докажите, что $K_I = -(\alpha r_к + r_б)/(r_к + r_б + R_н)$; $R_{вх} = r_э + r_б(1 - K_I)$;

$$R_{вых} = r_б + r_к - \left[\frac{r_б(r_б + r_к\alpha)}{R_г + r_э + r_б}\right].$$

8.137. Транзистор имеет следующие параметры: $h_{11э} = 1{,}4$ кОм, $h_{21э} = 45$, $h_{12э} = 4{,}3 \cdot 10^{-4}$, $h_{22э} = 18$ мкСм. Он используется в схеме усилителя с общим эмиттером. Сопротивление резистора нагрузки $R_н = 16$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г = 300$ Ом. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P.

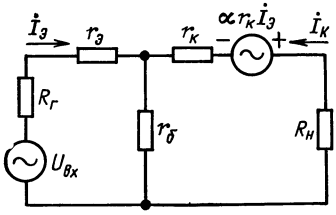


Рис. 8.46.

Решение. Схема замещения усилителя на транзисторе для малых сигналов изображена на рис. 8.47,*а*. Примем $\dot{I}_Б = \dot{I}_1$, $\dot{I}_К = \dot{I}_2$. Из рисунка следует, что для входной и выходной цепей справедливы следующие уравнения:

$$\dot{U}_1 = h_{11э}\dot{I}_1 + h_{21э}\dot{U}_2; \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = h_{21э}\dot{I}_1 + h_{22э}\dot{U}_2; \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{I}_2 R_н. \quad (3)$$

Умножив левую и правую части уравнения (1) на $h_{21э}$,

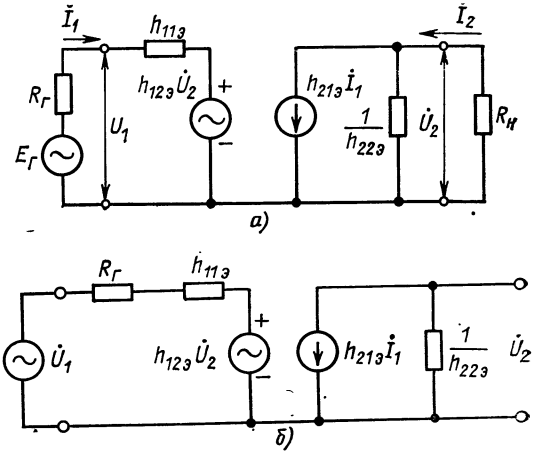


Рис. 8.47.

а левую и правую части уравнения (2) на $h_{11э}$, получим:

$$h_{21э}\dot{U}_1 = h_{21э}h_{11э}\dot{I}_1 + h_{12э}h_{21э}\dot{U}_2; \quad (4)$$

$$h_{11э}\dot{I}_2 = h_{11э}h_{21э}\dot{I}_1 + h_{11э}h_{22э}\dot{U}_2. \quad (5)$$

Вычитая (4) из (5), получаем:

$$h_{11э}\dot{I}_2 - h_{21э}\dot{U}_1 = (h_{11э}h_{22э} - h_{12э}h_{21э})\,\dot{U}_2, \quad (6)$$

где $h_{11э}h_{22э} - h_{12э}h_{21э} = \Delta h$ — детерминант матрицы.

Из (3)

$$\dot{I}_2 = -\dot{U}_2/R_н; \quad (7)$$

подставив (7) в (6), получим:

$$-h_{21э}\dot{U}_1 = \dot{U}_2(\Delta h + h_{11э}/R_н) =$$
$$= (\dot{U}_2/R_н)(\Delta h R_н + h_{11э}).$$

Следовательно,

$$K_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = -\frac{h_{21э}R_н}{h_{11э} + \Delta h R_н} =$$
$$= -\frac{45 \cdot 16 \cdot 10^3}{1{,}4 \cdot 10^3 + (1{,}4 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot 10^{-6} - 4{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 45) \cdot 16 \cdot 10^3} = -485.$$

Для определения коэффициента усиления по току K_I подставим (3) в (2), тогда

$$\dot{I}_2 = h_{21э}\dot{I}_1 - h_{22э}R_н\dot{I}_2, \quad (8)$$

или

$$\dot{I}_2(1 + h_{22э}R_н) = h_{21э}\dot{I}_1, \quad (9)$$

откуда

$$K_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{22э}R_н} = \frac{45}{1 + 18 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^3} = 34{,}9. \quad (10)$$

Выходное сопротивление определим из схемы на рис. 8.47,*б*. В этой схеме $R_г$ — внутреннее сопротивление источника сигнала. Из анализа схемы следует:

$$\dot{U}_1 = (R_г + h_{11э})\,\dot{I}_1 + h_{12э}\dot{U}_2; \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = h_{21э}\dot{I}_1 + h_{22э}\dot{U}_2. \quad (12)$$

Умножив (11) на $h_{21э}$ и (12) на $(R_г + h_{11э})$, получим:

$$h_{21э}\dot{U}_1 = h_{21э}(R_г + h_{11э})\,\dot{I}_1 + h_{21э}h_{12э}\dot{U}_2; \quad (13)$$

$$(R_г + h_{11э})\,\dot{I}_2 = h_{21э}(R_г + h_{11э})\,\dot{I}_1 + h_{22э}(R_г + h_{11э})\,\dot{U}_2. \quad (14)$$

Вычитая (13) из (14), получаем:

$$\dot{I}_2(R_г + h_{11э}) - h_{21э}\dot{U}_1 =$$
$$= [h_{22э}(R_г + h_{11э}) - h_{12э}h_{21э}]\,\dot{U}_2,$$

откуда

$$R_{\text{вых}}=\frac{\dot U_2}{\dot I_2}=\frac{R_{\text{г}}+h_{11\text{э}}}{h_{22\text{э}}(R_{\text{г}}+h_{11\text{э}})-h_{12\text{э}}h_{21\text{э}}}=$$

$$=\frac{R_{\text{г}}+h_{11\text{э}}}{h_{22}R_{\text{г}}+\Delta h}=\frac{1{,}4\cdot10^3+300}{18\cdot10^{-6}\cdot300+58\cdot10^{-4}}=152\ \text{кОм}.$$

Определим $R_{\text{вх}}$. Подставив (3) в (1), получим:

$$\dot U_1=h_{11\text{э}}\dot I_1-h_{12\text{э}}R_{\text{н}}\dot I_2. \qquad (15)$$

Из (9) найдем:

$$\dot I_2=h_{21\text{э}}\dot I_1/(1+h_{22\text{э}}R_{\text{н}}). \qquad (16)$$

Подставив это уравнение в (15), получим:

$$\dot U_1=h_{11\text{э}}\dot I_1-\frac{h_{21\text{э}}h_{12\text{э}}R_{\text{н}}}{1+h_{22\text{э}}R_{\text{н}}}\dot I_1.$$

Следовательно,

$$R_{\text{вх}}=\frac{\dot U_1}{\dot I_1}=h_{11\text{э}}-\frac{h_{21\text{э}}h_{12\text{э}}R_{\text{н}}}{1+h_{22\text{э}}R_{\text{н}}}=1{,}4\cdot10^3-$$

$$-\frac{45\cdot4{,}3\cdot10^{-4}\cdot16\cdot10^3}{1+18\cdot10^{-6}\cdot16\cdot10^3}=1160\ \text{Ом}.$$

Полное входное сопротивление с учетом внутреннего сопротивления источника колебаний $R'_{\text{вх}}=R_{\text{г}}+R_{\text{вх}}=300+1160=$ $=1460$ Ом.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P=|K_IK_U|=485\cdot34{,}9=17\,000.$$

8.138. В усилительном каскаде по схеме с общим эмиттером используется транзистор, имеющий следующие значения h-параметров: $h_{11\text{э}}=800$ Ом, $h_{21\text{э}}=47$, $h_{12\text{э}}=5\cdot10^{-4}$, $h_{22\text{э}}=80$ мкСм. Найти выходное напряжение и выходное сопротивление этого каскада, если ЭДС источника входного напряжения $E_{\text{вх}}=10$ мВ, внутреннее сопротивление источника входного напряжения $R_{\text{г}}=500$ Ом и сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_{\text{н}}=5$ кОм.

8.139. В усилительном каскаде по схеме с общим эмиттером используется транзистор, имеющий следующие значения h-параметров: $h_{11\text{э}}=800$ Ом, $h_{12\text{э}}=5\cdot10^{-4}$, $h_{21\text{э}}=48$, $h_{22\text{э}}=80$ мкСм. Найти выходную мощность, если ЭДС источника сигнала $E_{\text{вх}}=100$ мВ, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{\text{г}}=500$ Ом, сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_{\text{н}}=8$ кОм.

8.140. Транзистор, включенный по схеме с общей базой, имеет следующие значения h-параметров: $h_{11б}=18$ Ом, $h_{12б}=8\cdot10^{-4}$, $h_{21б}=-0{,}98$, $h_{22б}=1{,}6\cdot10^{-6}$ См. Определить коэффициент усиления каскада по мощности, если сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_н=15$ кОм.

8.141. Транзистор П407 имеет следующие значения h-параметров: $h_{11б}=20$ Ом, $h_{12б}=1{,}65\cdot10^{-4}$, $h_{21б}=-0{,}99$, $h_{22б}=0{,}85$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P этого транзистора, включенного в схему с общим коллектором, если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=30$ кОм, сопротивление резистора нагрузки $R_н=1$ кОм.

8.142. Транзистор, включенный в схему с общим коллектором, имеет следующие значения h-параметров: $h_{11к}=22$ кОм, $h_{12к}=1$, $h_{21к}=-31$, $h_{22к}=23\cdot10^{-6}$ См. Сопротивление резистора нагрузки в цепи эмиттера $R_н=1$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=10$ кОм. Определить коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P, входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$.

8.143. Транзистор в схеме с общим эмиттером имеет следующие значения h-параметров: $h_{11э}=2$ кОм, $h_{12э}=5{,}9\times10^{-4}$, $h_{21э}=60$, $h_{22э}=40$ мкСм. Сопротивление резистора нагрузки $R_н=30$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=2$ кОм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P.

8.144. В схеме с общей базой транзистор П407 в рабочей точке при $I_э=3$ мА и $U_{КБ}=3$ В имеет следующие значения h-параметров: $h_{11б}=20$ Ом, $h_{12б}=1{,}8\cdot10^{-4}$, $h_{21б}=-0{,}99$, $h_{22б}=1$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P этого транзистора, включенного в схему усилителя с общим эмиттером, если сопротивление резистора нагрузки $R_н=1$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=1{,}5$ кОм.

8.145. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, определить: а) в каких пределах будет изменяться входное сопротивление транзисторного каскада, если сопротивление нагрузки изменяется от 0 до ∞; б) в каких пределах будет изменяться выходное сопротивление при изменении входного сопротивления от 0 до ∞.

8.146. Транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, в рабочей точке при $I_Э=5$ мА и $U_К=5$ В имеет следующие значения h-параметров: $h_{11э}=1{,}6$ кОм, $h_{12э}=5\cdot10^{-4}$, $h_{21э}=115$, $h_{22э}=160$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P этого транзистора, включенного в схему с общей базой, если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=500$ Ом и сопротивление резистора нагрузки $R_н=10$ кОм.

8.147. Транзистор, включенный в усилитель с общим эмиттером, имеет следующие значения собственных параметров: $\alpha=0{,}99$, $r_б=100$ Ом, $r_к=2\cdot10^6$ Ом, $r_э=40$ Ом. Определить входное сопротивление $R_{вх}$ и коэффициент усиления каскада по напряжению на низких частотах K_U, если сопротивление резистора нагрузки $R_н=5$ кОм.

8.148. Транзистор МП103А, включенный в схему усилителя с общей базой, имеет следующие значения собственных параметров: $r_б=500$ Ом, $r_э=45$ Ом, $r_к=1$ МОм и $\alpha=0{,}97$. Сопротивление резистора нагрузки $R_н=2$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=500$ Ом. Определить коэффициенты усиления по току K_I, по напряжению K_U, по мощности K_P, а также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилительного каскада.

8.149. Определить те же величины, что и в предыдущей задаче, при условии, что транзистор МП103А включен в схему усилителя с общим коллектором.

8.150. Определить те же величины, что и в задаче 8.148, при условии, что транзистор МП103А включен в схему усилителя с общим эмиттером.

8.151. Докажите, что коэффициент усиления транзисторного каскада по мощности может быть выражен следующими формулами:

$$K_P=K^2_I R_н/R_{вх} \text{ или } K_P=K^2_U R_{вх}/R_н.$$

8.152. Докажите, что для любой схемы включения максимально возможный коэффициент усиления по мощности может быть найден по формуле

$$K_{P\,max}=\frac{h^2_{21}}{[(h_{11}h_{22}-h_{12}h_{21})^{1/2}+(h_{11}h_{22})^{1/2}]^2}.$$

Графо-аналитический расчет рабочего режима

8.153. Пользуясь справочником, определить: а) какой максимальный ток можно допустить в цепи коллектора транзистора П416 при комнатной температуре, если напря-

жение на коллекторе равно 10 В; б) какое максимальное напряжение возможно на коллекторе при токе в цепи коллектора 15 мА.

8.154. Транзистор МП103, характеристики которого даны на рис. 8.18, включен в схему усилителя с общей базой. Напряжение коллекторного источника равно 10 В, сопротивление резистора нагрузки в цепи коллектора $R_н = 0{,}2$ кОм. В режиме покоя ток эмиттера $I_{э0} = 3$ мА. При подаче сигнала ток эмиттера изменяется по закону $I_э = (3 \pm 2 \sin \omega t)$ мА. Требуется: а) определить координаты рабочей точки; б) нарисовать временные диаграммы напряжения коллектор—база $U_{КБ}$, тока коллектора $I_К$, напряжения эмиттер—база $U_{ЭБ}$, тока эмиттера $I_э$ и определить максимальное и минимальное значения этих величин.

8.155. Транзистор МП103, характеристики которого даны на рис. 8.8, включен в схему с общим эмиттером. Напряжение коллекторного источника равно 10 В, сопротивление резистора нагрузки в цепи коллектора $R_н = 1$ кОм, ток покоя базы $I_{Б0} = 300$ мкА. Требуется: а) определить амплитуды переменных составляющих коллекторного тока $I_{mК}$, напряжения коллектор—эмиттер $U_{mКЭ}$ и напряжения база—эмиттер $U_{mБЭ}$, если на вход подается сигнал вида $I_Б = (300 \pm 100 \sin \omega t)$ мкА; б) изобразить временные диаграммы напряжения коллектор—эмиттер $U_{КЭ}$, база—эмиттер $U_{БЭ}$, тока базы $I_Б$ и тока коллектора $I_К$.

8.156. Транзистор МП104 работает в режиме нагрузки в схеме с общим эмиттером при напряжении коллекторного источника, равном 16 В, напряжении коллектор—эмиттер $U_{КЭ0} = -7{,}5$ В и токе базы $I_{Б0} = 600$ мкА. Пользуясь семейством выходных характеристик транзистора, взятым из справочника, определить сопротивление резистора нагрузки в цепи коллектора и падение напряжения на нем.

8.157. Транзистор включен в усилительный каскад по схеме с общим эмиттером. Каскад питается от одного источника с напряжением $E = 10$ В. Для подачи смещения в цепь базы используется гасящий резистор (рис. 8.48). Характеристики транзистора изображены на рис. 8.49. Известно, что постоянная составляющая тока базы $I_{Б0} = 0{,}3$ мА, амплитуда переменной составляющей тока базы $I_{mБ} = 0{,}2$ мА, сопротивление резистора нагрузки $R_н =$

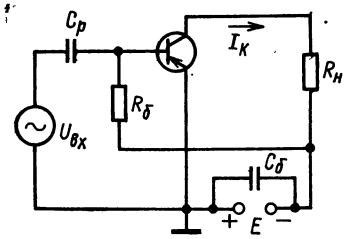


Рис. 8.48.

=500 Ом, а максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором, $P_{Кmax}$= =150 мВт. Требуется: а) построить линию $P_{Кmax}$; б) по выходным характеристикам найти: постоянную составляющую тока коллектора $I_{К0}$, постоянную составляющую напряжения коллектор—эмиттер $U_{КЭ0}$, амплитуду переменной составляющей тока коллектора $I_{mК}$, амплитуду выходного напряжения $U_{m\,н}$= $=U_{mКЭ}$, коэффициент усиления по току K_I, выходную мощность $P_{вых}$, мощность, рассеиваемую на нагрузке постоянной составляющей тока коллектора $P_{н0}$, полную потребляемую мощность в коллекторной цепи P_0, КПД коллекторной цепи η. Проверить, не превышает ли мощность, выделяемая на коллекторе в режиме покоя $P_{К0}$, максимально допустимую мощность $P_{Кmax}$; в) с помощью входных характеристик определить: напряжение смещения $U_{БЭ0}$, амплитуду входного сигнала $U_{mБЭ}$, входную мощность $P_{вх}$, коэффициенты усиления по напряжению K_U и по мощности K_P, входное сопротивление каскада $R_{вх}$, сопротивление резистора $R_б$ и емкость разделительного конденсатора $C_р$. Диапазон усиливаемых колебаний 80 Гц—5 кГц.

Решение. Расчет рабочего режима транзистора ведется так же, как и расчет рабочего режима электронных ламп. Однако поскольку во входной цепи транзистора при любой схеме включения протекает ток, то для расчета рабочего режима транзистора недостаточно одного семейства выходных характеристик, а требуется еще семейство, определяющее режим работы входной цепи.

Заметим, что в справочниках обычно дана одна входная характеристика, так как входные характеристики, снятые при различных выходных напряжениях, расположены близко друг к другу.

Порядок решения задачи следующий. На семействе выходных характеристик строим линию максимально допустимой мощности, используя уравнение

$$I'_{К\,max}=P_{К\,max}/|U_{КЭ}|=150\cdot10^{-3}/|U_{КЭ}|.$$

Подставляя в него значения $U_{КЭ}$, равные, например, —7,5; —10; —15 и —20 В, получаем значения $I_К$, равные 20; 15;

10 и 7,5 мА соответственно. Построенная по этим точкам линия P_{Kmax} показана на рис. 8.49,*б*.

Затем, используя уравнение линии нагрузки $I_K=(E+U_{KЭ})/R_н$, на семейство выходных характеристик наносим линию нагрузки: при $I_K=0$ $U_{KЭ}=-E=-10$ В — первая точка линии нагрузки; при $U_{KЭ}=0$ $I_K=E/R_н=10/500=20$ мА — вторая точка линии нагрузки.

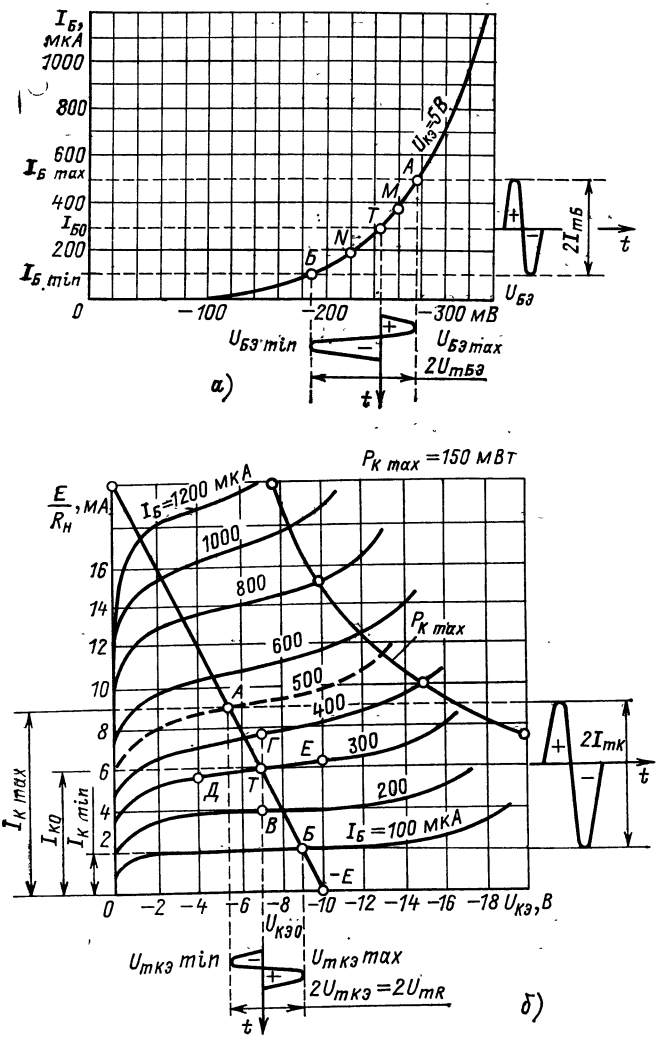


Рис. 8.49.

Точка пересечения линии нагрузки с характеристикой, соответствующей постоянной составляющей тока базы $I_{Б0}$ =300 мкА, определит рабочую точку. Ей будут соответствовать постоянная составляющая тока коллектора $I_{К0}$= =6 мА и постоянная составляющая напряжения $U_{КЭ0}$=— 7В.

Амплитуду переменной составляющей тока коллектора определим как среднюю:

$$I_{mК}=\frac{(I_{К\,max}-I_{К\,min})}{2}=\frac{(9\cdot10^{-3}-2\cdot10^{-3})}{2}=3{,}5\ \text{мА}.$$

Дальнейший расчет показан ниже.

Амплитуда переменного напряжения на нагрузке

$$U_{mR}=U_{mКЭ}=I_{mК}R_н=3{,}5\cdot10^{-3}\cdot0{,}5\cdot10^{3}=1{,}75\ \text{В}.$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I=I_{mК}/I_{mБ}=3{,}5\cdot10^{-3}/(0{,}2\cdot10^{-3})=17{,}5.$$

Выходная мощность

$$P_{вых}=0{,}5\,I_{mК}U_{mR}=0{,}5\cdot3{,}5\cdot10^{-3}\cdot1{,}75=3\ \text{мВт}.$$

Полная потребляемая мощность в коллекторной цепи

$$P_0=EI_{К0}=10\cdot6\cdot10^{-3}=60\ \text{мВт}.$$

КПД коллекторной цепи

$$\eta=P_{вых}/P_0=3\cdot10^{-3}/(60\cdot10^{-3})=0{,}05=5\%.$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе постоянной составляющей коллекторного тока,

$$P_{К0}=I_{К0}|U_{КЭ0}|=6\cdot10^{-3}\cdot7=42\ \text{мВт}<P_{К\,max}=150\ \text{мВт},$$

т. е. режим работы допустим.

Далее расчет ведем по семейству входных характеристик (рис. 8.49,*а*). Поскольку у транзисторов входные характеристики расположены близко друг к другу, то в качестве рабочей входной характеристики можно принять одну из статических входных характеристик, соответствующую активному режиму, например характеристику, снятую при $U_{КЭ}$=—5 В. Это можно сделать в том случае, если источник усиливаемых колебаний работает как генератор тока, т. е. когда внутреннее сопротивление источника колебаний значительно больше входного сопротивления транзистора. Из графика находим:

$$|U_{БЭ0}|=246\ \text{мВ}\approx0{,}25\ \text{В}.$$

Амплитуда входного напряжения

$$U_{mБЭ}=\frac{(277\cdot10^{-3}-187\cdot10^{-3})}{2}=\frac{90\cdot10^{-3}}{2}=45\ мВ.$$

Модуль коэффициента усиления по напряжению

$$|K_U|=U_{mКЭ}/U_{mБЭ}=1{,}75/(45\cdot10^{-3})=39.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P=|K_I K_U|=39\cdot17{,}5=690.$$

Входная мощность

$$P_{вх}=0{,}5I_{mБ}U_{mБ}=0{,}5\cdot0{,}2\cdot10^{-3}\cdot45\cdot10^{-3}=4{,}5\ мкВт.$$

Входное сопротивление

$$R_{вх}=U_{mБЭ}/I_{mБ}=45\cdot10^{-3}/(0{,}2\cdot10^{-3})=225\ Ом.$$

Сопротивление резистора

$$R_б=\frac{E-|U_{БЭ0}|}{I_{Б0}}=\frac{(10-0{,}25)}{0{,}3\cdot10^{-3}}=32{,}5\ кОм.$$

Емкость конденсатора $C_р$ определяется из условия

$$\frac{1}{\omega_н C_р}=\frac{R_{вх}}{10},$$

где $\omega_н$ — низшая рабочая частота.

И тогда

$$C_р=\frac{10}{\omega_н R_{вх}}=\frac{10}{2\pi f_н R_{вх}}=\frac{10}{6{,}28\cdot80\cdot225}\approx90\ мкФ.$$

8.158. Найти в рабочей точке усилителя, рассмотренного в задаче 8.157, параметры $h_{21э}$, $h_{22э}$, $R_{вых}=1/h_{22э}$, $h_{11э}$ и $Y_{21э}=S$ и аналитически рассчитать K_I, K_U, K_P, $R_{вх}$.

Решение. Рассчитаем параметры в рабочей точке при $U_{КЭ}=-7$ В и $I_{К0}=6$ мА:

$$h_{21э}=\beta=\left.\frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ}=const}.$$

По точкам *В* и *Г* (рис. 8.49,*б*) определим

$$h_{21э}=\frac{3{,}7\cdot10^{-3}}{0{,}2\cdot10^{-3}}=18{,}5.$$

По точкам $Д$ и E определим

$$h_{22э}=\left.\frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}}\right|_{I_Б=const};$$

$$h_{22э}=0{,}7\cdot10^{-3}/6=0{,}117\cdot10^{-3}=117 \text{ мкСм};$$

$$R_{вых}=1/h_{22э}=1/(0{,}117\cdot10^{-3})=8{,}5 \text{ кОм};$$

параметр

$$h_{11э}=\left.\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ}=const}$$

По точкам M и N (рис. 8.49,*а*) определим:

$$h_{11э}=40\cdot10^{-3}/(0{,}19\cdot10^{-3})=210 \text{ Ом}.$$

Крутизна транзистора

$$S=Y_{21э}=h_{21э}/h_{11э}=18{,}6/210=88 \text{ мА/В}.$$

С помощью найденных параметров определим искомые значения по приближенным формулам.

Коэффициент усиления по току $K_I\approx h_{21э}\approx18{,}5$, точнее,

$$K_I=h_{21э}R_{вых}/(R_н+R_{вых})=$$
$$=18{,}5\cdot8{,}5\cdot10^3/(0{,}5\cdot10^3+8{,}5\cdot10^3)=17{,}5$$

(сходится с графо-аналитическим расчетом).

Входное сопротивление

$$R_{вх}\approx h_{11э}\approx210 \text{ Ом}.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U\approx-h_{21э}R_н/R_{вх}\approx-18{,}5\cdot500/210=-44,$$

точнее

$$K_U=-17{,}5\cdot500/210=-41{,}5.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P=|K_IK_U|=17{,}5\cdot41{,}5=725.$$

8.159. Транзистор МП39 включен в усилительный каскад по схеме с общей базой. Напряжение источника $E_к=-20$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_н=1$ кОм, постоянная составляющая тока эмиттера $I_{э0}=10$ мА, амплитуда переменной составляющей тока эмиттера $I_{mэ}=5$ мА. Пользуясь характеристиками, изображенными на рис. 8.6, определить $I_{К0}$, $U_{КБ0}$, $I_{mК}$, $U_{mКБ}=U_{mR}$, $P_{вых}$, P_0, η, $P_{К0}$, K_I.

8.160. Транзистор МП39 включен в схему с общим эмиттером. Напряжение коллекторного источника питания 12 В,

сопротивление резистора нагрузки $R_н$=0,8 кОм. Пользуясь характеристиками, взятыми из справочника, выбрать рабочую точку, обеспечивающую режим класса А, и определить: а) амплитуду переменной составляющей коллекторного тока и выходного напряжения при подаче на вход синусоидального напряжения с амплитудой $U_{mвх}$=0,05 В; б) коэффициенты усиления каскада по току K_I, по напряжению K_U и по мощности K_P; в) максимальное значение входного сигнала, усиливаемого без искажений.

8.161. Транзистор МП40А включен в усилительный каскад по схеме с общим эмиттером. Напряжение коллекторного источника 12 В, сопротивление резистора нагрузки $R_н$=1,0 кОм. Требуется: а) на семействе выходных характеристик, взятых из справочника, построить линию нагрузки; выбрать рабочий участок и рабочую точку для работы с минимальными искажениями; б) определить амплитуду переменной составляющей коллекторного тока $I_{mК}$, амплитуду переменного напряжения на нагрузке U_{mR}, выходную мощность $P_{вых}$ и мощность, рассеиваемую коллектором; в) на входной характеристике выбрать рабочий участок и рабочую точку; г) определить входное сопротивление каскада.

8.162. Транзистор П415 включен в схему усилителя с общим эмиттером. Пользуясь справочником, определить постоянную составляющую тока коллектора $I_{К0}$, амплитуду переменной составляющей напряжения на нагрузке U_{mR}, выходную мощность $P_{вых}$, а также коэффициент усиления по току K_I, если напряжение коллекторного источника равно 12 В, сопротивление резистора нагрузки $R_н$= =200 Ом, постоянная составляющая тока базы $I_{Б0}$= =400 мкА, амплитуда тока базы $I_{mБ}$=300 мкА.

8.163. Транзистор МП104 включен по схеме с общим эмиттером. Известно, что постоянная составляющая входного тока $I_{Б0}$=600 мкА, амплитуда переменной составляющей входного тока $I_{mБ}$=300 мкА, напряжение $U_{КЭ0}$= =— 15 В, сопротивление нагрузки $R_н$=1 кОм. Определить: $E_К$, $I_{К0}$, $I_{mК}$, $U_{mКЭ}$, $U_{БЭ0}$, $U_{mБЭ}$, $P_{вых}$, $P_{вх}$, $P_К$, P_0, K_I, K_U, K_P, η коллекторной цепи. Проверить, не превышает ли мощность, рассеиваемая коллектором, максимально допустимую мощность $P_{К\,max}$.

8.164. Для транзистора МП15А, включенного в усилительный каскад по схеме с общим эмиттером, необходимо: а) построить рабочие характеристики при заданном напря-

жении коллекторного источника питания 15 В в рабочей точке с напряжением $U_{КЭ0}$ =—8 В и током коллектора $I_{К0}$=9 мА; б) определить сопротивление резистора нагрузки $R_н$; в) найти амплитуду входного сигнала из условия усиления при минимальных искажениях; г) определить амплитуду переменной составляющей тока коллектора $I_{mК}$; д) амплитуду переменного напряжения на нагрузке U_{mR}; е) коэффициент усиления по току K_I, по напряжению K_U, по мощности K_P. Характеристики взять из справочника.

Влияние температуры на работу транзисторов. Цепи питания. Стабилизация рабочей точки

8.165. У германиевого транзистора при температуре окружающей среды T=20 °С ток базы $I_Б$ =80 мкА, обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0}$ =10 мкА. Предполагая, что ток $I_{КБ0}$ удваивается при увеличении температуры на каждые 10 °С, определить ток коллектора при температурах 20, 40 и 60 °С при использовании этого транзистора в схеме с общим эмиттером. Считать, что коэффициент передачи тока базы β постоянен в рассматриваемом диапазоне температур и равен 49.

8.166. Чему равна максимально допустимая мощность транзистора ГТ108А, находящегося в воздушной среде при температуре T=20 °С, если тепловое сопротивление переход — окружающая среда $R_{пс}$ составляет 0,8 град/мВт, а максимально допустимая температура перехода $T_{пmax}$= =80 °С?

Решение. Температура перехода

$$T_п = T_с + R_{пс} P_{КЭ},$$

где $T_п$ — температура перехода, °С; $T_с$ — температура окружающей среды, °С; $R_{пс}$ — тепловое сопротивление переход — окружающая среда, град/мВт; $P_{КЭ}$ — мощность, выделяемая на эмиттерном и коллекторном переходах, мВт.

Считая $T_п$ равной $T_{пmax}$ и подставляя числовые значения величин, получаем:

$$P_{КЭ} = (T_п - T_с)/R_{пс} = (80 - 20)/0{,}8 = 75 \text{ мВт}.$$

8.167. Некоторый транзистор выделяет на коллекторном переходе мощность $P_{КЭ}$=25 мВт. Тепловое сопротивление переход — окружающая среда $R_{пс}$=0,5 град/мВт. Какую

температуру имеет коллекторный переход, если температура окружающей среды T_c=40 °С?

8.168. Какую температуру будет иметь коллекторный переход транзистора, рассмотренного в предыдущей задаче, если с использованием теплоотвода сопротивление переход — среда уменьшилось до $R_{пс}$=0,3 град/мВт.

8.169. Максимально допустимая температура коллекторного перехода транзистора, описанного в задачах 8.167 и 8.168, равна 90 °С. Чему равна максимально допустимая мощность, выделяемая на коллекторном переходе без теплоотвода и с теплоотводом при температуре окружающей среды T_c=40 °С?

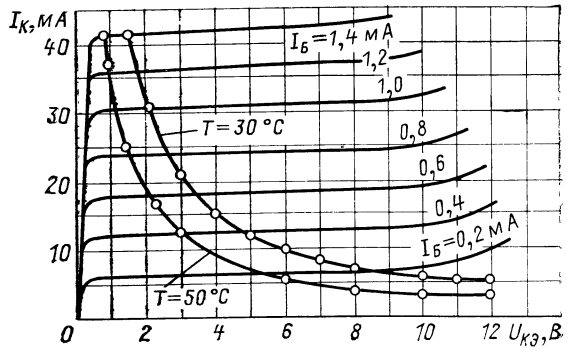


Рис. 8.50.

8.170. На выходных характеристиках транзистора ГТ108А для схемы с общим эмиттером (рис. 8.50) построить линии максимально допустимой мощности при температурах окружающей среды 30 и 50 °С, если максимально допустимая температура перехода $T_{пmax}$=80 °С и тепловое сопротивление переход — среда $R_{пс}$=0,8 град/мВт.

Решение. Найдем максимальную мощность, рассеиваемую в транзисторе при температуре 30 °С, по формуле

$$P_{КЭ\,max} = (T_п - T_c)/R_{пс} = (80 - 30)/0{,}8 = 62{,}5 \text{ мВт}.$$

Поскольку $P_{КЭ} = U_{КЭ} I_К$, то, задаваясь значениями $U_{КЭ}$, подсчитаем значения тока коллектора по формуле $I_{К\,max} = P_{КЭ\,max}/U_{КЭ}$. Полученные результаты приведены ниже:

$U_{КЭ}$, В	1,5	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12
$I_{К\,max}$, мА . .	41,5	31,3	21	15,6	12,5	10,4	9,0	7,8	6,31	5,71	5,2

При температуре $T_c = 50°C$ $P_{КЭ\,max} = (80 - 50)/0{,}8 = 37{,}5$ мВт.

Аналогично, задаваясь значениями $U_{КЭ}$, определяем значения $I_К$:

$U_{КЭ}$, В	0,9	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12
$I_К$, мА	41,6	37,5	25	18,8	12,5	9,4	6,25	4,7	3,8	3,11

Построенные по этим данным кривые показаны на рис. 8.50.

8.171. Германиевый транзистор ГТ108А используется в схеме на рис. 8.9. Определить температуру, при которой произойдет тепловой пробой, если транзистор имеет следующие данные: максимально допустимая температура перехода $T_{пmax}$=80 °С, тепловое сопротивление переход — среда $R_{Tпс}$=0,8 град/мВт, обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0}$ = 10 мкА при 20 °С, коэффициент передачи тока базы $\beta = 50$ (постоянен в интервале температур от 20 до 80 °С). Напряжение источника $E_{КЭ} = -10$ В.

Решение. Мощность, рассеиваемая транзистором,

$$P_{КЭ} = U_{ЭК} I_К. \qquad (1)$$

Тогда изменение мощности, вызванное изменением температуры,

$$dP_{КЭ} = \frac{\partial P_{КЭ}}{\partial U_{ЭК}} dU_{ЭК} + \frac{\partial P_{КЭ}}{\partial I_К} dI_К. \qquad (2)$$

Поскольку $U_{ЭК}$ — величина постоянная, то $dU_{ЭК} = 0$, поэтому

$$dP_{КЭ} = \frac{\partial P_{КЭ}}{\partial I_К} dI_К, \qquad (3)$$

но

$$\frac{\partial P_{КЭ}}{\partial I_К} = U_{ЭК}. \qquad (4)$$

Следовательно,

$$dP_{КЭ} = U_{ЭК} dI_К, \qquad (5)$$

но

$$dI_К = S_{IК} dI_{КБ0}, \qquad (6)$$

где $S_{IK}=\Delta I_K/\Delta I_{КБ0}$ — коэффициент температурной нестабильности по току.

Для данной схемы

$$S_{IK}=\beta+1=51; \tag{7}$$

подставляя (6) и (7) в (5), получаем:

$$dP_{КЭ}=U_{ЭК}(\beta+1)dI_{КБ0}. \tag{8}$$

Предположив, что ток $I_{КБ0}$ удваивается при повышении температуры на каждые 10 °С, можно записать:

$$I_{КБ0}=I_{КБ0\ (T_0=20°C)}\cdot 2^{(T-T_0)/10}. \tag{9}$$

Для удобства расчетов выразим число 2 как некоторую степень числа e. Так как $2=e^{0,7}$, то (9) можем переписать в следующем виде:

$$I_{КБ0}=I_{КБ0\ (T_0=20°C)}\ e^{A\ (T-T_0)}, \tag{10}$$

где $A=0,07$.

Дифференцируем (10) по T:

$$\frac{dI_{КБ0}}{dT}=AI_{КБ0\ (T_0=20\ °C)}\ e^{A\ (T-T_0)}. \tag{11}$$

Подставив (10) в (11), получим:

$$\frac{dI_{КБ0}}{dT}=AI_{КБ0}, \tag{12}$$

или

$$dI_{КБ0}=AI_{КБ0}dT.$$

Подставив (12) в (8), получим:

$$dP_{КЭ}=U_{ЭК}(\beta+1)AI_{КБ0}dT.$$

Следовательно,

$$dP_{КЭ}/dT=U_{ЭК}(\beta+1)AI_{КБ0}=10\cdot 51\cdot 0,07I_{КБ0}=35,07I_{КБ0},$$

где $dP_{КЭ}/dT$ измеряется в милливаттах на градус, а $I_{КБ0}$ в миллиамперах.

Предполагая, что $dP_{КЭ}/dT\approx\Delta P_{КЭ}/\Delta T$, и приравнивая это выражение величине, обратной тепловому сопротивлению (условие теплового пробоя), получаем:

$$\Delta P_{КЭ}/\Delta T=1/R_{пс}.$$

В рассматриваемом случае $35{,}07 I_{КБ0} = (1/0{,}8)$ мВт/град, откуда $I_{КБ0} \approx 36$ мкА. Этот результат означает, что тепловой пробой транзистора произойдет, если обратный ток коллекторного перехода этого транзистора $I_{КБ0} \geqslant 36$ мкА. Из (9) можно легко найти температуру перехода, при которой ток $I_{КБ0}$ достигнет 36 мкА:

$$I_{КБ0} = I_{КБ0\,(T_0=20\,°C)} \cdot 2^{(T_п - T_0)/10}. \qquad (13)$$

Логарифмируя (13), получаем:

$$\lg \frac{I_{КБ0}}{I_{КБ0\,(T_0=20\,°C)}} = \frac{T_п - T_0}{10} \lg 2,$$

тогда

$$\lg \frac{36}{10} = \frac{T_п - 20}{10} \lg 2,$$

следовательно,

$$0{,}56 = \frac{(T - 20)}{10} \cdot 0{,}301,$$

откуда $T = 5{,}6/0{,}301 + 20 = 38{,}6$ °С. Итак, при данных условиях тепловой пробой транзистора ГТ108А при обрыве в цепи базы произойдет при температуре перехода $T_п = 38{,}6$ °С.

8.172. Мощный транзистор, имеющий тепловое сопротивление между переходом и корпусом $R_{пк} = 0{,}8$ К/Вт, должен рассеивать мощность $P_{КЭ} = 10$ Вт при температуре окружающей среды $T_с = 32$ °С. Для повышения надежности температуру перехода решено ограничить 70 °С. В сборочной конструкции содержатся шайба и изолирующая силиконовая смазка. Тепловое сопротивление шайбы равно 1,5 К/Вт, а силиконовая смазка уменьшает его примерно на 40%. Определить, какова должна быть площадь теплоотвода, если он необходим? Считать, что 1 см² металлической поверхности теплоотвода имеет тепловое сопротивление 800 К/Вт.

Решение. Определяем тепловое сопротивление между корпусом и теплоотводом $R_{кт}$, учитывая, что силиконовая смазка уменьшает тепловое сопротивление шайбы на 40%;

$$R_{кт} = 1{,}5 - 1{,}5 \cdot 0{,}4 = 0{,}9 \text{ К/Вт}.$$

Общее тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой определяется выражением

$$R_{пс} = R_{пк} + R_{кт} + R_{тс}, \qquad (1)$$

где $R_{пс}$ — тепловое сопротивление переход — среда; $R_{пк}$ — тепловое сопротивление переход — корпус; $R_{кт}$ — тепловое сопротивление корпус — теплоотвод; $R_{тс}$ — тепловое сопротивление теплоотвод — среда.

В выражении (1) неизвестны тепловое сопротивление переход — среда $R_{пс}$ и тепловое сопротивление теплоотвод — среда $R_{тс}$.

Можно также записать:

$$T_п = T_с + R_{пс} P_{кэ}. \qquad (2)$$

Из (2), подставляя значения, данные в условии задачи, получаем:

$$R_{пс} = (T_п - T_с) / P_{кэ} = (70 - 32) / 10 = 3{,}8 \text{ К/Вт}.$$

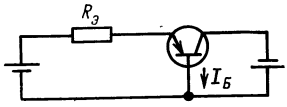


Рис. 8.51.

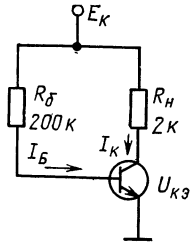


Рис. 8.52.

Подставляя значение $R_{пс}$ в (1) и решая его относительно $R_{тс}$, определяем:

$$R_{тс} = R_{пс} - R_{пк} - R_{кт} = 3{,}8 - 0{,}8 - 0{,}9 = 2{,}1 \text{ К/Вт}.$$

Полагая, что 1 см² металлической поверхности имеет тепловое сопротивление 800 К/Вт, и считая, что $R_{тс}$ изменяется обратно пропорционально площади поверхности теплоотвода, найдем площадь теплоотвода

$$П = 800 \cdot 1 / 2{,}1 = 381 \text{ см}^2.$$

8.173. Объясните, увеличится или уменьшится ток базы в схеме на рис. 8.51 при увеличении температуры?

8.174. Транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 49$ используется в схеме, изображенной на рис. 8.52. Определить напряжение $U_{КЭ}$ при $T = 50$ °С, если обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0} = 10$ мкА зависит от температуры по закону $I_{КБ0} = I'_{КБ0} e^{0{,}08\,(T - T_0)}$, где $T - T_0 = 50 - 25 = 25$ °С. Напряжение источника $E_К = +20$ В.

Решение.

$$I'_{КБ0}=I_{КБ0}e^{0,03\,(T-T_0)}=10\cdot10^{6}e^{0,08\cdot25}=74\ \text{мкА};$$

$$\Delta I_{КБ0}=I'_{КБ0}-I_{КБ0}=74-10=64\ \text{мкА}.$$

Тогда изменение напряжения

$$\Delta U_{КЭ}=-\Delta I_{К}(\beta+1)R_{н}=-64\cdot10^{-6}(49+1)\cdot2\cdot10^{3}=-6,4\ \text{В}.$$

Напряжение коллектор — эмиттер при $T=25\,°C$ $U_{КЭ}=$ $=+E_{к}-I_{К}R_{н}$, но

$$I_{К}=\beta I_{Б}+I_{КБ0}(1+\beta)=49\cdot20/200\cdot10^{3}-$$
$$-10\cdot10^{-6}\cdot(49+1)=5,4\ \text{мА}.$$

Таким образом, $U_{КЭ}=+20-5,4\cdot10^{-3}\cdot2\cdot10^{3}=+9,2$ В.

Напряжение коллектор—эмиттер при $T=50\,°C$ $U'_{КЭ}=$ $=U_{КЭ}+\Delta U_{КЭ}=+9,2+(-6,4)=+2,8$ В.

8.175. Транзистор с $\beta=50$ и $I_{КБ0}=10$ мкА при $T=$ $=25\,°C$ используется в схеме, изображенной на рис. 8.52. Напряжение $E_{К}=+20$ В и $U_{БЭ}=100$ мВ. Определить напряжение $U_{КЭ}$ при $T=25$ и $50\,°C$. Считать, что температурный коэффициент напряжения $\partial U_{БЭ}/\partial T=-2,5$ мВ/град.

Решение. При $T=25\,°C$

$$I_{Б}=(E_{К}-U_{БЭ})/R_{б}=(20-0,1)/200\cdot10^{3}=99,5\ \text{мкА};$$

$$I_{К}=\beta I_{Б}+I_{КБ0}(\beta+1)=50(99,5\cdot10^{-6})+10\cdot10^{-6}\cdot51=$$
$$=4,98+0,51=5,49\ \text{мА};$$

$$U_{КЭ}=E_{К}-I_{К}R_{н}=+20-5,49\cdot10^{-3}\cdot2\cdot10^{3}=+9\ \text{В}.$$

При $T=50\,°C$ напряжение на эмиттерном переходе уменьшится до значения

$$U'_{БЭ}=U_{БЭ}+\frac{\partial U_{БЭ}}{\partial T}\Delta T=100\cdot10^{-3}-2,5\cdot10^{-3}(50-25)=$$
$$=37,5\ \text{мВ}.$$

Следовательно,

$$I'_{Б}=(20-37,5\cdot10^{-3})/200\cdot10^{3}=20/(200\cdot10^{3})=0,1\ \text{мА}.$$

Заметим, что из-за большого значения сопротивления $R_{б}$ изменение напряжения $U_{БЭ}$, вызванное изменением температуры, почти никакой роли не играет. Изменение тока базы, вызванное изменением напряжения $U_{БЭ}$, $\Delta I_{Б}=$

$=100-99{,}5=0{,}5$ мкА. Изменение тока коллектора, вызванное этой же причиной, составляет $50(0{,}5\cdot10^{-6})=25$ мкА.

Новое значение $I_{КБ0}$ определим по формуле

$$I'_{КБ0}=I_{КБ0}e^{0{,}08\Delta T}=10\cdot10^{-6}e^{0{,}08\,(50-25)}=74 \text{ мкА}.$$

Новое значение тока коллектора

$$I_К=\beta I_Б+I_{КБ0}(\beta+1)=50(0{,}1\cdot10^{-3})+74\cdot10^{-6}\cdot51=8{,}7 \text{ мА},$$

следовательно,

$$U_{КЭ}=+20-8{,}7\cdot10^{-3}\cdot2\cdot10^{3}=+2{,}6 \text{ В}.$$

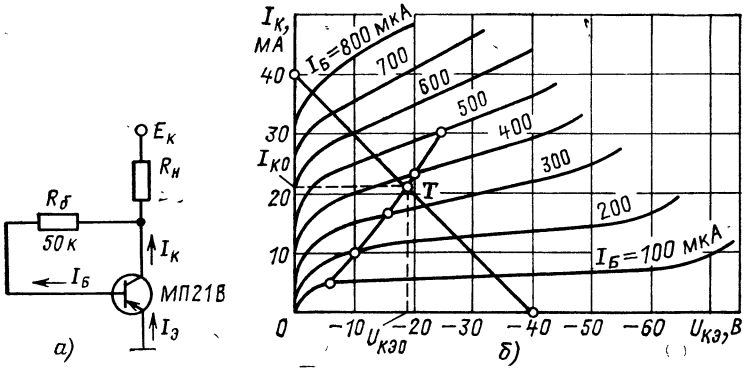


Рис. 8.53.

8.176. Транзистор МП21В работает в схеме, изображенной на рис. 8.53,*а*. Пользуясь выходными характеристиками транзистора (рис. 8.53,*б*), графически определить рабочую точку при $E_К=-40$ В и $R_н=1$ кОм.

Решение.

$$U_{КЭ}=E_К+I_Э R_н=E_К+(I_Б+I_К)R_н.$$

Так как $I_Б\approx-U_{КЭ}/R_Б$, то, подставляя это значение в уравнение для $U_{КЭ}$, получаем:

$$U_{КЭ}=E_К+(-U_{КЭ}/R_б+I_К)R_н.$$

Решив последнее уравнение относительно $U_{КЭ}$, получим уравнение линии нагрузки:

$$U_{КЭ}=\frac{E_К}{1+R_н/R_б}+\frac{R_н}{1+R_н/R_б}I_К.$$

Положив $I_К = 0$, найдем первую точку линии нагрузки:

$$U_{КЭ} = \frac{E_К}{1 + R_н/R_б} = \frac{-40}{1 + 1/50} = \frac{-40}{1 + 0{,}02} \approx -40 \text{ В},$$

а при $U_{КЭ} = 0$ — вторую точку линии нагрузки:

$$I_К = -E_К / R_н = 40/10^3 = 40 \text{ мА}.$$

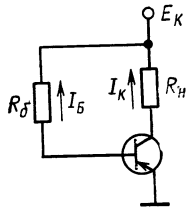
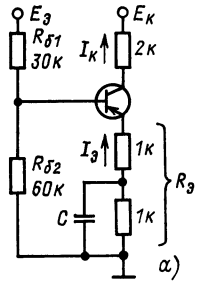


Рис. 8.54.



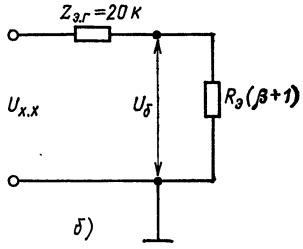


Рис. 8.55.

Чтобы найти рабочую точку, необходимо на семействе характеристик построить линию смещения, воспользовавшись соотношением $U_{КЭ} \approx -I_Б R_б$.

Задаваясь значениями $I_Б$ и подставляя их в последнее уравнение, находим значения $U_{КЭ}$:

$I_Б$, мкА	100	200	300	400	500
$U_{КЭ}$, В	—5	—10	—15	—20	—25

Точка пересечения линии нагрузки с линией смещения определяет рабочую точку ($U_{КЭ} = -19$ В, $I_{К0} = 22$ мА).

8.177. В схеме на рис. 8.54 используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 50$ и обратным током коллектора $I_{КБ0} = 10$ мкА. Напряжение источника питания $E_К = -15$ В. Определить $R_б$ и $R_н$, если ток коллектора $I_К = 1$ мА, напряжение коллектор — эмиттер $U_{КЭ} = -6$В.

Решение. Известно, что ток коллектора $I_К = \beta I_Б + I_{КБ0}(1 + \beta)$, откуда

$$I_Б = \frac{I_К - I_{КБ0}(1 + \beta)}{\beta} = \frac{1 - 10 \cdot 10^{-3}(1 + 50)}{50} = 10 \text{ мкА}.$$

Сопротивление резистора $R_б$ определим по формуле

$$R_б = (-E_К + U_{БЭ})/I_Б.$$

Поскольку $U_{БЭ} \ll E_К$, то $R_б \approx -E_К/I_Б = 15/10 \cdot 10^{-6} = 1{,}5$ МОм. Найдем сопротивление резистора нагрузки:

$$R_н = (-E_К + U_{КЭ})/I_К = (15-6)/(1 \cdot 10^{-3}) = 9 \text{ кОм}.$$

8.178. Дана схема (рис. 8.55,а). Определить коллекторный ток, если коэффициент передачи тока базы транзистора $\beta = 50$, обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0} \approx 0$ и $E_Э = -30$ В, $E_К = -40$ В.

Решение. Воспользовавшись методом эквивалентного генератора, преобразуем внешнюю цепь базы. Электродвижущая сила эквивалентного генератора (напряжение холостого хода)

$$U_{х.х} = E_Э \frac{R_{б2}}{R_{б1} + R_{б2}} = \frac{(-30) \cdot 60}{30 + 60} = -20 \text{ В}.$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора (сопротивление короткого замыкания)

$$Z_{э.г} = \frac{R_{б1} R_{б2}}{R_{б1} + R_{б2}} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} = 20 \text{ кОм}.$$

Входное сопротивление, измеряемое между выводом базы и заземленным выводом эквивалентной схемы, $R_{вх} = R_э(\beta+1) = 2 \cdot 51 = 102$ кОм. Эквивалентная схема контура эмиттер — база показана на рис. 8.55,*б*. Из этой схемы определим

$$U_Б = U_{х.х} \frac{R_э(\beta+1)}{R_э(\beta+1) + Z_{э.г}} = -20 \frac{102}{102+20} = -16{,}7 \text{ В}.$$

Поскольку $U_{БЭ} \approx 0$, то $U_Э = -16{,}7$ В. Определим ток эмиттера:

$$I_Э = -U_Э/R_э = 16{,}7/(2 \cdot 10^3) = 8{,}35 \text{ мА}.$$

Следовательно,

$$I_К \approx \alpha I_Э = \frac{\beta}{(\beta+1)} I_Э = \frac{50}{(50+1)} 8{,}35 \cdot 10^{-3} = 8{,}2 \text{ мА}.$$

8.179. Схема усилителя изображена на рис. 8.56. Рассчитать цепи смещения, если рабочая точка задана следующими координатами: $I_К = 1$ мА; $U_{КЭ} = -6$ В и коэффициент усиления каскада $K_U = -8$.

Решение. $U_{R_н} = I_К R_н = 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^3 = 8$ В. Поскольку напряжение $U_{КЭ} = -6$ В, то суммарное напряжение на резисторах в цепи эмиттера $U_Э = 30 - 6 - 8 = 16$ В. Пренебрегая током $I_{КБ0}$, получаем $I_Б = I_К/\beta = 1 \cdot 10^{-3}/50 = 20$ мкА. Следовательно, $I_Э = I_К + I_Б = 1 + 0{,}02 = 1{,}02$ мА ≈ 1 мА. При $|K_U| \leqslant 10$ справедливо приближенное равенство $K_U \approx -R_н/R_э$, где K_U — коэффициент усиления по напряжению, откуда $R_э = R_н/|K_U| = 8 \cdot 10^3/8 = 1$ кОм.

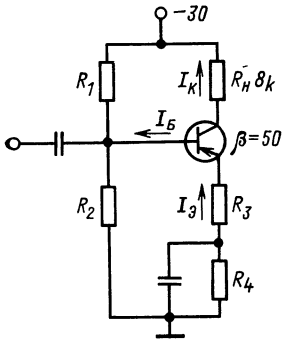


Рис. 8.56.

Как видим, сопротивление $R_э$ является сопротивление резистора R_3. Напряжение на этом резисторе $R_{R_3} = I_Э R_3 = 1 \cdot 10^3 \cdot 1{,}02 \cdot 10^{-3} \approx 1$ В. Следовательно, падение напряжения на резисторе R_4 $U_{R_4} = 16 - 1 = 15$ В. Таким образом, $R_4 = 15/(1 \cdot 10^{-3}) = 15$ кОм.

Рассчитаем делитель в цепи базы.

Для стабильной работы схемы необходимо, чтобы ток через R_2 по крайней мере раз в 10 был больше тока базы.

Поскольку $I_Б = 20$ мкА, возьмем $I_{дел} = 200$ мкА. Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно считать, что $U_Б \approx U_Э = -16$ В, откуда $R_2 = 16/(200 \cdot 10^{-6}) = 80$ кОм. Определим R_1:

$$R_1 = (-E_К + U_Э)/(I_Б + I_{дел}) = (30 - 16)/(220 \cdot 10^{-6}) = 63{,}5 \text{ кОм}.$$

Частотные и импульсные свойства транзисторов

8.180. База в германиевом транзисторе типа *n-p-n* имеет ширину 0,025 мм. Определить: а) время, необходимое неосновным носителям для пролета базы; б) время, необходимое неосновным носителям для пролета базы в аналогичном транзисторе типа *p-n-p*; в) каким частотам переменного напряжения соответствуют найденные значения времени пролета.

8.181. Решить предыдущую задачу для кремниевых транзисторов типов *p-n-p* и *n-p-n*.

8.182. Вычислить напряженность электрического поля в *p*-базе диффузионного транзистора с экспоненциальным распределением примеси в базе и время пролета носителей

через базу, если дано: материал — германий, концентрация примеси меняется от 10^{18} см$^{-3}$ при $x=0$ до $2{,}5\cdot10^{13}$ см$^{-3}$ при $x=w$, а ширина базы $w=2$ мкм (при вычислении времени пролета принять, что перенос носителей в базе осуществляется только диффузионным путем).

8.183. Какова будет напряженность поля в базе кремниевого транзистора с диффузионным распределением примеси в n-базе, если концентрация примеси меняется от 10^{18} до 10^{10} см$^{-3}$, а ширина базы $w=2$ мкм? Вычислить также время пролета носителей τ через базу, считая, что перенос носителей заряда осуществляется только путем диффузии.

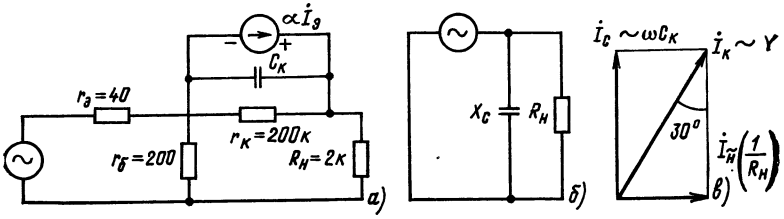


Рис. 8.57.

8.184. Пользуясь справочником, выбрать тип сплавного германиевого транзистора, пригодного для работы в качестве усилителя на частоте 20 МГц.

8.185. Определить, во сколько раз емкостное сопротивление коллекторного перехода транзистора меньше его активного сопротивления, если емкость коллекторного перехода равна 50 пФ, выходная проводимость 4 мкСм, а рабочая частота 1 МГц.

8.186. Емкость коллекторного перехода германиевого сплавного транзистора равна 10 пФ при обратном напряжении смещения 10 В. Чему равна емкость при нулевом напряжении смещения (считайте контактную разность потенциалов $\varphi_к=0{,}3$ В)?

8.187. Транзистор работает в схеме с общей базой с нагрузкой $R_н=2$ кОм. Его параметры: $r_э=40$ Ом, $r_б=200$ Ом, $r_к=200$ кОм, $C_к=20$ пФ. На какой частоте за счет влияния емкости $C_к$ модуль коэффициента усиления $|K_I|$ уменьшится вдвое? Внутренним сопротивлением источника сигнала пренебречь.

Решение. Изобразим Т-образную схему замещения транзистора (рис. 8.57,*а*). Ток, протекающий через $R_н$, должен быть в 2 раза меньше тока, протекающего через него на низкой частоте (когда емкостью $C_к$ пренебрегаем) (рис. 8.57,*б*).

Так как можно пренебречь $r_э$ и внутренним сопротивлением источника сигнала ввиду их малости, то токи пропорциональны проводимостям (рис. 8.57,*в*):

$$1/R_н \text{ и } Y=\sqrt{(1/R_н)^2+(\omega C_к)^2}.$$

По условию задачи на высокой частоте $1/R_н=Y/2$. Следовательно,

$$\frac{2}{R_н}=Y=\sqrt{\left(\frac{1}{R_н}\right)^2+(\omega C_к)^2}=$$

$$=\frac{\sqrt{1+(\omega C_к R_н)^2}}{R_н}.$$

После преобразования получаем: $4=1+(\omega C_к R_н)^2$, откуда $\omega=\sqrt{3}/(C_к R_н)$;

$$f=\frac{\sqrt{3}}{2\pi C_к R_н}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi\cdot 20\cdot 10^{-12}\cdot 2\cdot 10^3}\approx 7 \text{ МГц}.$$

8.188. В германиевом *p-n-p* транзисторе с толщиной базы $w=2\cdot 10^{-4}$ см, работающем при температуре $T=300$ К, ток эмиттера $I_э=2$ мА. Определить сопротивление эмиттера, время пролета носителей через базу, предельную частоту $f_{h_{21б}}$, диффузионную емкость эмиттерного перехода.

8.189. Кремниевый транзистор типа *p-n-p* имеет предельную частоту $f_{h_{21б}}=1$ МГц. Какова толщина базы?

8.190. Для германиевого транзистора типа *n-p-n* с шириной базы $w=2{,}5\cdot 10^{-3}$ см найти предельные частоты $f_{h_{21б}}$ и $f_{h_{21э}}$, если транзистор работает при $T=300$ К.

8.191. На низких частотах коэффициент передачи тока эмиттера транзистора $h_{21б0}=-0{,}96$, его предельная частота $f_{h_{21б}}=5$ МГц. Определить: а) модуль коэффициента передачи тока эмиттера $|h_{21б}|$ этого транзистора на частоте 10 МГц; б) частоту, на которой модуль коэффициента передачи тока эмиттера уменьшается до 0,6.

Решение. Известно, что коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б}$ изменяется с частотой согласно следующему выражению:

$$h_{21б}=h_{21б0}\left[\frac{1}{1+j(f/f_{h_{21б}})}\right],$$

где $h_{21б_0}$ — коэффициент передачи тока эмиттера на низкой частоте; $f_{h_{21б}}$ — предельная частота, т. е. частота, на которой $|h_{21б}| = |h_{21б_0}|/\sqrt{2}$. Следовательно, если $|h_{21б_0}| = 0{,}96$, $f_{h_{21б}} = 5$ МГц и $f = 10$ МГц, то

$$|h_{21б}| = \frac{0{,}96}{\sqrt{1+(10/5)^2}} = 0{,}43;$$

при $h_{21б_0} = -0{,}96$, $|h_{21б}| = 0{,}6$ и $f_{h_{21б}} = 5$ МГц

$$f = f_{h_{21б}}\sqrt{(h_{21б_0}/h_{21б})^2 - 1} = 5\sqrt{(0{,}96/0{,}6)^2 - 1} = 6{,}25 \text{ МГц}.$$

8.192. Докажите, что $f_{h_{21б}} = f_{h_{21э}}/(1 + h_{21б_0})$. Используя это уравнение, покажите, что при $|h_{21б_0}| \approx 1$ $f_{h_{21э}} \approx f_{h_{21б}} h_{21э}$.

8.193. При условии, что коэффициент передачи тока базы транзистора в схеме с общим эмиттером на низкой частоте равен 50 и предельная частота передачи тока равна 1 МГц, определить модуль и фазу коэффициента передачи тока на предельной частоте.

8.194. На частоте 20 МГц транзистор имеет $|h_{21э}| = 9$. Чему равна граничная частота $f_{гр}$? Чему равен $|h_{21э}|$ на частоте 6 МГц, если на частоте 1 кГц $h_{21э} = 30$?

8.195. Определить модуль и фазу коэффициента передачи тока эмиттера транзистора в схеме с общей базой на частоте, большей предельной в 3 раза, если коэффициент передачи тока эмиттера на низких частотах $h_{21б0} = -0{,}98$.

8.196. Определить предельную частоту передачи тока транзистора ГТ104 при включении его в схему с общей базой, если граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером этого транзистора $f_{гр} = 160$ МГц, а коэффициент передачи тока базы $h_{21э0} = 50$.

8.197. Предельная частота передачи тока эмиттера в схеме с общей базой транзистора $f_{h_{21б}} = 20$ МГц, $h_{21б0} = -0{,}98$. Подсчитать коэффициент передачи тока этого транзистора на частоте 100 кГц в схеме с общим эмиттером.

8.198. Покажите, что выражение для предельной частоты, полученное из рассмотрения гибридной схемы замещения, имеет вид:

$$f_{h_{21э}} = (1 + h_{21б_0})/[2\pi r'_э (C_э + C_к)].$$

8.199. При $T = 300$ К в рабочей точке с координатами $I_К = 10$ мА и $U_{КЭ} = 10$ В при работе на низких частотах

транзистор имеет следующие значения h-параметров: $h_{11э}=500$ Ом, $h_{12э}=10^{-4}$, $h_{21э}=100$, $h_{22э}=50$ мкСм. Вычислите все параметры гибридной схемы замещения, если $f_{гр}=50$ МГц и $C_к=3$ пФ.

Решение. Гибридная схема замещения изображена на рис. 8.58. Расчет ее параметров произведен по следующим формулам:

$$g_s=I_К/U_T,$$

где $I_К$ — ток коллектора в рабочей точке; $U_T=kT/e$ — температурный потенциал.

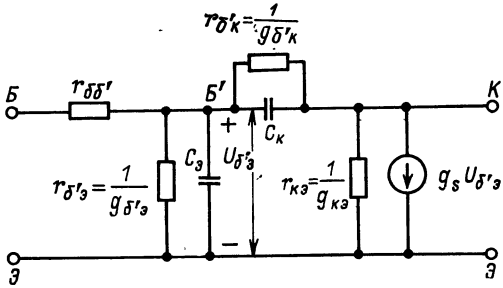


Рис. 8.58.

В рассматриваемом случае

$$g_s=10\cdot10^{-3}/(25{,}8\cdot10^{-3})=0{,}388 \text{ См};$$

$$r_{б'э}=1/g_{б'э}=h_{21э}/g_s=h_{21э}U_T/I_К=100/0{,}388=258 \text{ Ом};$$

$$r_{бб'}=h_{11э}-r_{б'э}=500-258=242 \text{ Ом};$$

$$r_{б'к}=1/g_{б'к}=r_{б'э}/h_{12э}=258/10^{-4}=2{,}58 \text{ МОм};$$

$$g_{кэ}=1/r_{кэ}=h_{22э}-(1+h_{21э})\,g_{б'к}=$$

$$=50\cdot10^{-6}-101\cdot0{,}388\cdot10^{-6}=10{,}8\cdot10^{-6} \text{ См};$$

$$r_{кэ}=1/g_{к.э}=92{,}5 \text{ кОм};$$

$$C_э=g_s/(2\pi f_{гр})=0{,}388/(2\pi\cdot50\cdot10^6)=1235\cdot10^{-12}=1235 \text{ пФ}.$$

8.200. Некоторый транзистор при $T=300$ К в рабочей точке при $I_К=5$ мА и $U_{КЭ}=10$ В имеет следующие значения параметров: $h_{21э}=100$, $h_{11э}=600$ Ом, $|h_{21э}|=10$ при $f=10$ МГц, $C_к=3$ пФ. Определить: $f_{h_{21э}}$, $f_{гр}$, $f_{h_{21б}}$, $C_э$, $r_{б'э}$ и $r_{бб'}$.

8.201. При $T=300$ К в рабочей точке с координатами $I_К=1$ мА и $U_{КЭ}=-10$ В у транзистора $g_{б'э}=0{,}5$ мСм,

граничная частота $f_{гр}=10$ МГц. Известно, что при увеличении тока коллектора до 2 мА граничная частота увеличивается до 12 МГц. Считая, что при этом параметр $h_{21э}$ не изменяется, определить: а) $h_{21э}$; б) $C_э$ при $I_К=1$ мА; в) $C_э$ при $I_К=2$ мА; г) $r_{б'э}$ при $I_К=2$ мА.

8.202. Кремниевый планарный транзистор при $T=300$ К в рабочей точке с координатами $U_{КЭ}=10$ В и $I_К=2$ мА имеет следующие значения параметров гибридной схемы замещения $C_к=2$ пФ, $g_{кэ}=30$ мкСм. Определить параметры $C_к$ и $g_{кэ}$ в рабочей точке с координатами $U_{КЭ}=6$ В и $I_К=5$ мА, если известно, что при $U_{КЭ}=10$ В и $I_К=0$ емкость $C_к=1{,}8$ пФ.

8.203. В гибридной схеме замещения (рис. 8.58) $r_{бб'}=65$ Ом, $g_{б'э}=0{,}62$ мСм, $g_{б'к}=0{,}5$ мкСм, $g_s=40$ мСм, $g_{кэ}=33$ мкСм. Определить низкочастотные h-параметры транзистора для схемы с общим эмиттером: $h_{11э}$, $h_{12э}$, $h_{21э}$ и $h_{22э}$.

8.204. По значениям параметров гибридной схемы замещения, данных в задаче 8.203, вычислить все Y-параметры для гибридной П-образной схемы замещения.

8.205. Пояснить особенности работы транзистора в импульсном режиме. Какое влияние оказывают процессы накопления и рассасывания носителей заряда в базе на работу транзистора в импульсном режиме?

8.206. Поясните способы измерения параметров большого сигнала.

8.207. Что понимают под насыщающим током базы? Напишите условие запирания и насыщения транзистора, работающего в ключевом режиме в схеме с общим эмиттером. Что понимают под временем включения, временем накопления и временем выключения транзистора?

8.208. Нарисуйте временные диаграммы переходных процессов в ключе с общим эмиттером. Какими мерами можно улучшить свойства транзисторов, работающих в импульсном режиме?

8.209. Нарисуйте схему замещения транзистора, работающего в режиме ключа в схеме с общим эмиттером.

8.210. По выходным характеристикам транзистора МП103 в схеме с общим эмиттером (см. рис. 8.8) при $E_К=10$ В, $R_н=1$ кОм определить: а) максимальное значение тока коллектора в импульсе при импульсе тока базы, равном 400 мкА; б) минимальное значение импульса тока базы, при котором ток коллектора в импульсе будет иметь

максимально возможное значение; в) максимальное значение напряжения на сопротивлении нагрузки в импульсе при импульсе тока базы, равном 1000 мкА; г) коэффициент передачи тока базы.

8.211. По выходным характеристикам транзистора в схеме с общей базой (см. рис. 8.18) при $E_К = -10$ В и $R_н = 2$ кОм определить: а) максимальное значение тока коллектора в импульсе при импульсе тока эмиттера, равном 3 мА; б) минимальное значение тока эмиттера, при котором ток коллектора в импульсе будет иметь максимально возможное значение; в) максимальное значение напряжения на сопротивлении нагрузки в импульсе при импульсе тока эмиттера, равном 25 мА.

Полевые транзисторы

8.212. Выводы электродов некоторого полевого транзистора маркированы *A*, *B*, *C*. Сопротивление, измеренное между выводами *B* и *C* с оборванным выводом *A*, равно 300 Ом и не зависит от полярности напряжения. При напряжении —2 В, приложенном к *A* и *B*, течет ток 10^{-11} А. Какой вывод соединен с затвором? Какого типа канал (*n* или *p*) имеет данный транзистор?

8.213. Покажите, что если полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом работает при достаточно низком напряжении сток — исток, то его можно представить в виде резистора, сопротивление которого определяется выражением

$$R = R_0 [1 - (|U_{ЗИ}|/U_{отс})^{1/2}]^{-1},$$

где R_0 — сопротивление канала при нулевом напряжении затвор — исток; $U_{отс}$ — напряжение отсечки; $U_{ЗИ}$ — напряжение между затвором и истоком.

8.214. а) Удельная проводимость канала *n*-типа полевого транзистора $\sigma = 20{,}9$ См/м и ширина канала $w = 6$ мкм при напряжении затвор — исток, равном нулю. Найти напряжение отсечки $U_{отс}$, считая, что подвижность электронов $\mu_n = 0{,}13$ м²/(В·с), а относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon = 12$. б) При напряжении затвора, равном нулю, сопротивление сток — исток равно 50 Ом. При каком напряжении затвора сопротивление сток — исток станет равным 200 Ом?

Решение. а) Удельная проводимость канала *n*-типа

$$\sigma = \mu_n e N_д,$$

где $N_д$ — концентрация примеси; μ_n — подвижность электронов.

Следовательно,

$$N_д = \sigma/(\mu_n e) = 20{,}9/(0{,}13 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}) = 10^{21}\ м^{-3}.$$

Напряжение отсечки

$$U_{отс} = eN_д a^2/(2\varepsilon\varepsilon_0),$$

где a — половина ширины канала, когда напряжение затвор — исток $U_{ЗИ} = 0$;

$$U_{отс} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21} (3{,}0 \cdot 10^{-6})^2/(2 \cdot 12 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}) = 6{,}8\ В.$$

б) Сопротивление сток — исток (см. задачу 8.213)

$$R_{СИ} = \frac{R_0}{1 - (|U_{ЗИ}|/U_{отс})^{1/2}},$$

где R_0 — сопротивление сток—исток при $U_{ЗИ} = 0$. При $R_{СИ} = 200$ Ом имеем:

$$200 = \frac{50}{1 - (|U_{ЗИ}|/6{,}8)^{1/2}},$$

откуда $|U_{ЗИ}| = 3{,}83$ В (отрицательное относительно истока).

8.215. В кремниевом полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом с каналом p-типа половина ширины канала при напряжении $U_{ЗИ} = 0$ составляет 3 мкм. Удельное сопротивление канала равно 0,1 Ом·м. Определить: а) напряжение отсечки $U_{отс}$, полагая, что подвижность дырок $\mu_p = 0{,}05\ м^2/(В \cdot с)$ и относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon = 12$; б) половину ширины канала, если напряжение затвора $U_{ЗИ} = U_{отс}/2$ и ток стока равен нулю.

8.216. Крутизна полевого транзистора S с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа в области насыщения при напряжении $U_{ЗИ} = -0{,}7$ В и $U_{СИ} = 10$ В равна 1 мА/В. Чему равна крутизна транзистора при напряжениях $U_{ЗИ} = -1$ В и $U_{СИ} = 10$ В, если напряжение отсечки транзистора $U_{отс} = +3$ В.

8.217. Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом, имеющим $I_{Cmax} = 2$ мА и $S_{max} = 2$ мА/В, включен в усилительный каскад по схеме с общим истоком. Сопротивление резистора нагрузки $R_н = 10$ кОм. Определить коэффи-

циент усиления по напряжению, если: а) $U_{ЗИ}=-1$ В; б) $U_{ЗИ}=-0{,}5$ В; в) $U_{ЗИ}=0$.

Решение. а) Найдем напряжение отсечки

$$U_{отс}=2I_{Cmax}/S_{max}=2\cdot 2\cdot 10^{-3}/(2\cdot 10^{-3})=2 \text{ В}.$$

Определим крутизну транзистора при $U_{ЗИ}=-1$ В:

$$S=S_{max}(1-|U_{ЗИ}|/U_{отс})=2(1-1/2)=1 \text{ мА/В}.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$|K_U|=SR_н=1\cdot 10^{-3}\cdot 10\cdot 10^3=10.$$

б) При напряжении затвора $U_{ЗИ}=-0{,}5$ В

$$S=2(1-0{,}5/2)=1{,}5 \text{ мА/В};$$

$$|K_U|=1{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 10\cdot 10^3=15.$$

в) При напряжении затвора, равном нулю,

$$S=2(1-0/2)=2 \text{ мА/В};$$

$$|K_U|=2\cdot 10^{-3}\cdot 10\cdot 10^3=20.$$

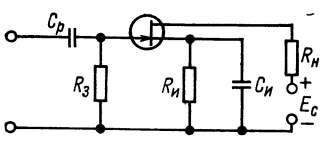


Рис. 8.59.

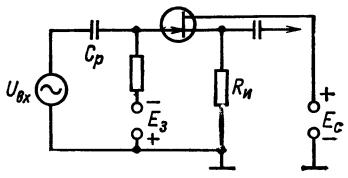


Рис. 8.60.

8.218. У некоторого полевого транзистора с управляющим p-n-переходом $I_{Cmax}=1$ мА и $U_{отс}=4$ В. Определить: а) какой ток будет протекать при обратном напряжении смещения затвор — исток, равном 2 В; б) чему равна крутизна и максимальная крутизна в этом случае.

Решение. а) Ток стока найдем из выражения

$$I_C=I_{C\,max}(1-|U_{ЗИ}|/U_{отс})^2=1\cdot 10^{-3}(1-2/4)^2=0{,}25 \text{ мА}.$$

б) Крутизна полевого транзистора

$$S=\frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}}=\frac{2I_{C\,max}}{U_{отс}}\left(1-\frac{|U_{ЗИ}|}{U_{отс}}\right)=$$

$$=\frac{2\cdot 10^{-3}}{4}\left(1-\frac{2}{4}\right)=0{,}25 \text{ мА/В}.$$

Максимальная крутизна

$$S_{max}=2I_{Cmax}/U_{отс}=2\cdot10^{-3}/4=0{,}5\ мА/В.$$

8.219. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом имеет $I_{Cmax}=2$ мА и $U_{отс}=5$ В. Определить ток стока I_C и крутизну S транзистора при напряжениях затвора, равных: а) —5 В; б) 0; в) —2,5 В.

8.220. В усилительном каскаде с общим истоком сопротивление нагрузки $R_н=20$ кОм (рис. 8.59). Эффективное входное сопротивление полевого транзистора 20 кОм, рабочая крутизна $S=2$ мА/В. Определить коэффициент усиления каскада.

Решение. Результирующее сопротивление нагрузки

$$Z_н=\frac{1}{1/20+1/20}=10\ кОм.$$

Коэффициент усиления каскада

$$K_U=SZ_н=2\cdot10^{-3}\cdot10\cdot10^3=20.$$

8.221. Стоковый повторитель (рис. 8.60) имеет ток стока $I_C=5$ мА и $S=1{,}5$ мА/В, $R_И=500$ Ом, $U_{RИ}=U_{ИС}$. Определить: а) K_U; б) $R_{вых}$; в) E_C.

Решение.

$$K_U|=SR_И/(1+SR_И)=2\cdot10^{-3}\cdot500/(1+2\cdot10^{-3}\cdot500)=0{,}5;$$

$$R_{вых}=R_И/(1+SR_И)=500/(1+2\cdot10^{-3}\cdot500)=250\ Ом;$$

$$U_{RИ}=I_CR_И=5\cdot10^{-3}\cdot500=2{,}5\ В;$$

$$E_C=2{,}5+2{,}5=5\ В.$$

8.222. В усилителе, показанном на рис. 8.61, при $|U_{ЗИ}|=2$ В ток стока $I_C=1$ мА. Определить: а) сопротивление резистора $R_И$, если падением напряжения $I_ЗR_З$ пренебречь; б) E_C, если $R_И=10$ кОм, $U_{СИ}=4$ В.

Решение.

а) $R_И=|U_{ЗИ}|/I_C=2{,}0/(1\cdot10^{-3})=2$ кОм;

б) $E_C=I_CR_н+U_{СИ}+I_CR_И=10+4+2=16$ В.

8.223. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом и каналом *n*-типа используется в цепи усилительного каскада, изображенной на рис. 8.62. Напряжение отсечки транзистора $U_{отс}=+2$ В, максимальный ток стока $I_{Cmax}=1{,}8$ мА. Известно, что при напряжении источника питания $E_C=20$ В протекает ток стока $I_C=1$ мА. Модуль коэф-

фициента усиления усилителя по напряжению $|K_U|=10$. Определить: а) напряжение смещения затвор — исток $U_{ЗИ}$; б) крутизну транзистора в рабочей точке S; в) сопротивление резистора в цепи истока $R_И$; г) сопротивление нагрузки в цепи стока $R_С$. Предположите, что внутреннее сопротивление транзистора $R_i \gg R_С$ и что на рабочей частоте емкостное сопротивление C пренебрежимо мало.

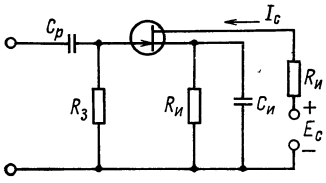


Рис. 8.61.

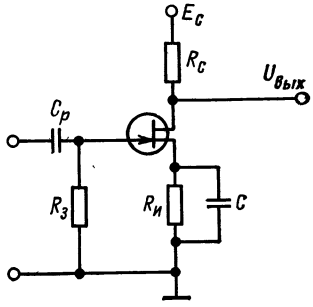


Рис. 8.62.

Решение. а) Определим напряжение затвор — исток $U_{ЗИ}$, используя выражение

$$I_С = I_{С\,max}(1 - |U_{ЗИ}|/U_{отс})^2.$$

Подставляя значения, данные в условии задачи, получаем:

$$1 \cdot 10^{-3} = 1{,}8 \cdot 10^{-3}(1 - |U_{ЗИ}|/2)^2,$$

откуда

$$|U_{ЗИ}| = +0{,}5 \text{ В}.$$

б) Найдем максимальную крутизну прибора

$$S_{max} = 2I_{Cmax}/U_{отс} = 2 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-3}/2 = 1{,}8 \text{ мА/В}.$$

Следовательно, крутизна транзистора в рабочей точке

$$S = S_{max}(1 - |U_{ЗИ}|/U_{отс}) = 1{,}8 \cdot 10^{-3}(1 - 0{,}5/2) = 1{,}35 \text{ мА/В}.$$

в) Вычислим сопротивление резистора в цепи истока:

$$R_И = |U_{ЗИ}|/I_С = 0{,}5/(1 \cdot 10^{-3}) = 0{,}5 \text{ кОм}.$$

г) Учитывая, что $R_i \gg R_С$, сопротивление резистора в цепи стока найдем из выражения

$$|K_U| = SR_С,$$

откуда

$$R_C = |K_U| / S = 10 / (1{,}35 \cdot 10^{-3}) = 7{,}4 \text{ кОм}.$$

8.224. Опишите устройство и принцип действия МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналом p-типа.

8.225. В МДП-транзисторе с каналом n-типа ширина затвора 0,8 мм, длина канала l=5 мкм, толщина слоя диэлектрической изоляции (оксидного) d=150 нм, подвижность электронов в канале μ_n=0,02 м²/(В·с), относительная диэлектрическая проницаемость оксидной пленки ε=3,7, напряжение сток — исток в пологой части характеристики (при насыщении) $U_{СИ}$ =8 В. Определить крутизну прибора в области насыщения.

Решение. Крутизну прибора в области насыщения вычислим по следующей формуле:

$$S = \mu_n C_З U_{СИ} / l^2,$$

где μ_n — подвижность электронов в канале; $C_З$ — емкость затвора; l — длина канала; $U_{СИ}$ — напряжение сток — исток при насыщении.

Определим емкость затвора

$$C_З = \varepsilon\varepsilon_0 П / d = 3{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6} / (150 \cdot 10^{-9}) =$$
$$= 0{,}87 \text{ пФ}.$$

Следовательно, крутизна

$$S = 0{,}02 \cdot 0{,}87 \cdot 10^{-12} \cdot 8 / (5 \cdot 10^{-6})^2 = 5{,}57 \text{ мА/В}.$$

8.226. Составьте схему стокового повторителя, использующего МДП-транзистор со встроенным каналом p-типа, работающий в режиме обогащения. На вход усилителя подается переменное напряжение с амплитудой 20 В, напряжение смещения затвора равно 0, ток стока I_C=3 мА, напряжение затвор — исток $U_{ЗИ}$ =—7 В, сопротивление резистора нагрузки $R_н$=100 МОм. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U и выходное сопротивление $R_{вых}$.

8.227. Усилители, в которых используется МДП-транзистор, работающий в режиме обогащения, имеют преимущества перед другими усилительными устройствами в подаче напряжения смещения. Каковы эти преимущества?

Глава девятая

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРИБОРЫ

9.1. Начертить схему питания электродов прожектора электронно-лучевой трубки с электростатической фокусировкой. Определить сопротивление резисторов делителя, от которого должны быть получены следующие напряжения: модулятора $U_м$, изменяющееся от 0 до —100 В; первого анода U_{a1}, изменяющееся от 300 до 500 В; второго анода U_{a2}=2 кВ. Ток делителя равен 2 мА. Катодным током самой трубки пренебречь. Определить также напряжение источника анодного питания E_a.

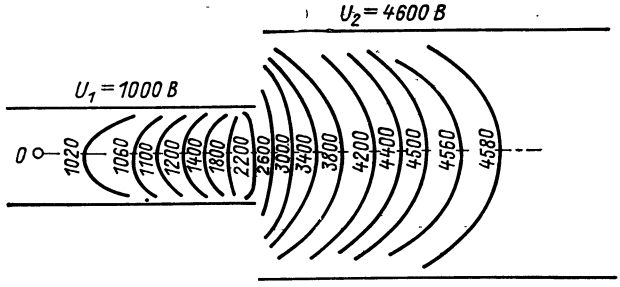


Рис. 9.1.

9.2. На рис. 9.1 изображено распределение потенциалов в электрической линзе, образованной двумя цилиндрами различного радиуса. На эквипотенциальных поверхностях указаны соответствующие им потенциалы. Требуется: а) изобразить силовые линии этого поля; б) построить примерные траектории электронов, выходящих из точки 0 под разными углами; определить, в какой примерно точке поля они фокусируются; в) нарисовать оптическую аналогию рассмотренной электрической линзы; г) объяснить, где будут фокусироваться электроны, если увеличивать разность потенциалов между цилиндрами.

9.3. В электронно-лучевой трубке с электростатической фокусировкой пятно сфокусировано на экране. Затем сначала уменьшается, а потом увеличивается относительно исходного состояния напряжение первого анода. Объяснить, как изменяются траектории движения электронов в обоих случаях и что будет видно на экране трубки.

9.4. Электроны со скоростью, соответствующей 600 В, попадают в электростатическую отклоняющую систему перпендикулярно вектору напряженности электрического по-

ля пластин. Длина пластин $l=2$ см; расстояние между пластинами $d=0{,}8$ см; постоянное напряжение сигнала $U=200$ В; расстояние от края пластин до экрана $L=15$ см. Найти линейное отклонение электронов после прохождения пластин и на экране.

9.5. Определить действующее значение отклоняющего синусоидального напряжения в электростатической отклоняющей системе, если на экране видна светящаяся линия длиной 8 см, а чувствительность по отклонению $h'_y=0{,}4$ мм/В.

9.6. Вольтметр электромагнитной системы показал напряжение между отклоняющими пластинами, равное 23 В. На экране была видна светящаяся линия длиной 4,6 см. Найти чувствительность по отклонению пластин, если подводимое напряжение синусоидальное.

9.7. На отклоняющие пластины подано синусоидальное напряжение. На экране видна прямая линия длиной 5 см. Определить амплитудное значение напряжения, если чувствительность по отклонению $h'_y=0{,}4$ мм/В.

9.8. Электронно-лучевая трубка имеет отклоняющие пластины длиной $l=6$ см. Расстояние между пластинами $d=2$ см. Экран расположен на расстоянии 20 см от середины пластин. Напряжение второго анода $U_{a2}=1500$ В. Найти длину линии, которая будет наблюдаться на экране, если к отклоняющим пластинам подводится переменное синусоидальное напряжение с действующим значением, равным 50 В.

9.9. На второй анод электронно-лучевой трубки подано напряжение $U_{a2}=1000$ В. Определить амплитуду напряжения, поданного на горизонтально отклоняющие пластины, если расстояние от экрана до горизонтально отклоняющих пластин равно 0,3 м, длина пластин 0,02 м, расстояние между ними 0,004 м, а электронный луч вычертил на экране линию длиной в 4 мм.

9.10. В электронно-лучевой трубке используются отклоняющие пластины длиной 2 см. Расстояние между пластинами 0,5 см. Пластины системы вертикального отклонения удалены от экрана на 49 см, а пластины системы горизонтального отклонения — на 52 см. Какова чувствительность по отклонению пластин вертикального и горизонтального отклонения, если ускоряющее напряжение равно: а) 1000 В; б) 1500 В?

9.11. Определить напряжение второго анода, при котором электронный луч будет отклоняться от центра экрана на 2 см под действием приложенного к отклоняющим пластинам напряжения 50 В. Расстояние между отклоняю-

щими пластинами 0,4 см, длина отклоняющих пластин 5 см, расстояние от экрана до отклоняющих пластин $L=16$ см.

9.12. Определить смещение пятна на экране электронно-лучевой трубки, если напряжение второго анода $U_{a2}=1000$ В, отклоняющее напряжение, подаваемое на пластины, $U=100$ В, длина пластин $l=2$ см, расстояние между пластинами $d=0{,}8$ см, а расстояние от отклоняющих пластин до экрана $L=20$ см.

9.13. На Y-пластины электронно-лучевой трубки подается напряжение вида $U_y=100\sin(2\pi\cdot1000t)$, а на X-пластины $U_x=120\sin(2\pi\cdot250t)$. Какие координаты будет иметь электрон на экране во время $t=0{,}0002$ с, если чувствительность по отклонению обеих пар пластин одинакова и равна $h'=0{,}23$ мм/В?

9.14. Рассчитать и построить график зависимости чувствительности электростатической отклоняющей системы от напряжения второго анода U_{a2}, если длина пластин $l=10$ мм, расстояние между пластинами $d=4$ мм и расстояние от середины пластин до экрана $L=16$ см. Напряжение второго анода меняется на $\pm25\%$ от $U_{a2}=1000$ В.

9.15. Y-пластины электронно-лучевой трубки длиной $l=1{,}8$ см расположены друг от друга на расстоянии 0,4 см. Расстояние от середины пластин до экрана $L=28$ см, напряжение второго анода $U_{a2}=1500$ В. Определить: в) горизонтальную составляющую скорости луча; б) время пролета электрона в пространстве между пластинами; в) вертикальную составляющую скорости луча к моменту выхода из пластин при постоянном отклоняющем напряжении 30 В; г) минимальное значение постоянного отклоняющего напряжения, при котором луч попадет на пластину.

9.16. Определить чувствительность электростатической отклоняющей системы электронно-лучевой трубки, если напряжение второго анода $U_{a2}=2000$ В, длина пластин $l=0{,}02$ м, расстояние между ними $d=4$ мм, а расстояние от экрана до ближайшего к экрану края пластин $L=0{,}15$ м.

9.17. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, определить предельную частоту отклоняющей системы осциллографической трубки.

9.18. Для условий задачи 9.16 определить изменение чувствительности по отклонению электронно-лучевой трубки, если угол пролета электронов в отклоняющем поле $\omega\tau=\pi/2$; $\omega\tau=\pi$ и $\omega\tau=5\pi$. Определить частоты переменных напряжений на отклоняющих пластинах, которые будут соответствовать данным углам пролета. Напряжение второго анода электронно-лучевой трубки $U_{a2}=2$ кВ.

9.19. Ускоряющая разность потенциалов электронно-лучевой трубки равна 1000 В. На отклоняющие пластины подано синусоидальное напряжение. Длина пластин вдоль оси трубки $l=2$ см. Определить, какова максимальная частота, при которой электрон не будет оставаться в пространстве между пластинами в течение одного полупериода; в течение какой доли периода электроны остаются в промежутке между пластинами, если частота переменного напряжения равна 50 Гц.

9.20. Электрическое поле в области между пластинами электронно-лучевой трубки создается за счет приложенного к пластинам напряжения, изменяющегося по закону $U=60\sin(2\pi\cdot 10^8 t)$. Трубка имеет следующие размеры: длина от края пластин до экрана $L=0{,}16$ м, длина пластин $l=0{,}02$ м, расстояние между пластинами $d=8$ мм. Напряжение на втором аноде $U_{a2}=1000$ В. Каково отклонение электрона на экране трубки, если он поступает в пространство между отклоняющими пластинами в тот момент, когда фаза отклоняющего напряжения равна нулю?

9.21. Электронно-лучевая трубка имеет следующие размеры: длина от края пластин до экрана $L=30$ см, длина пластин $l=2{,}5$ см, расстояние между пластинами $d=1$ см. Напряжение второго анода $U_{a2}=1000$ В. Электрон влетает в пространство между отклоняющими пластинами, когда фаза отклоняющего напряжения равна нулю. Найти значение отклонения электрона на экране, если отклоняющее напряжение будет равно: а) 300 В; б) $300\sin(1000t)$; в) $300\sin(20\cdot 10^8 t)$.

9.22. Электронно-лучевая трубка имеет следующие размеры: длина пластин $l=2$ см, расстояние между пластинами $d=0{,}5$ см, расстояние от пластин до экрана $L=30$ см. На второй анод подано напряжение $U_{a2}=1000$ В, а отклоняющее напряжение $U=50$ В. Требуется произвести расчет и сравнить отклонение электронов на экране полем плоскопараллельных пластин и полем косо расставленных пластин, если у последних расстояние на выходе вдвое больше, чем на входе.

9.23. Нарисуйте картину фокусирующего магнитного поля короткой линзы и объясните принцип ее действия. Какими способами можно улучшить качество магнитной фокусировки?

9.24. В электронно-лучевой трубке с магнитной фокусировкой пятно сфокусировано на экране. Затем сначала уменьшается, а потом увеличивается ток фокусирующей катушки. Объясните, как изменяются траектории движе-

ния электронов в обоих случаях и что будет наблюдаться на экране.

9.25. Определить число ампер-витков магнитной катушки, необходимое для фокусировки луча электронно-лучевой трубки, если напряжение U_{a2}=6000 В, расстояние от прожектора до экрана 240 мм и от катушки до экрана 135 мм. Средний диаметр катушки 64 мм. Какое число витков должна иметь катушка при фокусирующем токе в ней 60 мА?

9.26. Кинескоп 59ЛК2Б работает в типовом режиме при напряжении второго анода U_{a2}=20 000 В. Определить, во сколько раз необходимо изменить ток фокусирующей катушки для обеспечения фокусировки, если анодное напряжение уменьшится на 5000 В.

9.27. Напряжение анода электронно-лучевой трубки с магнитной фокусировкой и магнитным отклонением U_a= =14,4 кВ. Электронный луч проходит расстояние 5 см через область поперечного магнитного поля. Определить магнитную индукцию, необходимую для отклонения луча на 17,5°.

9.28. В электронно-лучевой трубке с магнитной фокусировкой пятно сфокусировано на экране. Объяснить, как изменятся траектории движения электронов и что будет видно на экране, если анодное напряжение уменьшать относительно исходного состояния.

9.29. Система магнитного отклонения имеет две катушки, соединенные последовательно по 4150 витков каждая. На экране видна линия длиной 42 мм. Синусоидальный ток в катушках имеет действующее значение 23 мА. Найти чувствительность по отклонению системы.

9.30. На горловину электронно-лучевой трубки типа ЛМ надета отклоняющая катушка, имеющая 5000 витков. По катушке протекает ток 40 мА и создает магнитное поле, отклоняющее луч на длину диаметра экрана, равную 135 мм. Определить чувствительность отклоняющей системы трубки.

9.31. Рассчитать и построить график зависимости чувствительности магнитной отклоняющей системы от напряжения анода, если длина катушек 5 см, расстояние от экрана до горловины колбы 10 см. Считать, что напряжение анода меняется на ±25% значения U_{a2}=1000 В.

9.32. Сравните относительные изменения чувствительности по отклонению двух электронно-лучевых трубок, если известно, что все размеры одной из них в 2 раза меньше, чем другой, при этом анодное напряжение меньшей трубки вдвое меньше, чем у большей. Рассчитайте относитель-

ные изменения чувствительности как электростатической, так и магнитной систем отклонения.

9.33. Отклоняющая катушка круглой формы установлена на горловине электронно-лучевой трубки 19ЛМ35 на расстоянии 180 мм от экрана. Определить чувствительность отклоняющей системы, если $U_а$=4000 В. Коэффициент γ для круглых катушек равен 0,12 $В^{1/2}/А$.

9.34. Определить, как изменится чувствительность по отклонению трубки 19ЛМ35, если при условиях предыдущей задачи отклоняющую катушку сдвинуть: а) на 20 мм ближе к экрану; б) на 20 мм дальше от экрана.

9.35. Электронно-лучевая трубка типа ЛК имеет чувствительность по отклонению 0,65 мм/А, диаметр экрана 135 мм, число витков отклоняющей катушки 2000. Какой ток следует пропустить через отклоняющую катушку, чтобы луч переместился на расстояние, равное радиусу экрана?

9.36. Горизонтально отклоняющие пластины некоторой электронно-лучевой трубки имеют длину l=1,5 см, расстояние между ними d=0,4 см, расстояние от середины пластин до экрана L=18 см и напряжение второго анода $U_{а2}$= =1000 В. Требуется: а) определить отклонение на экране, вызываемое постоянным напряжением 100 В; б) определить магнитную индукцию поля, действующего в том же пространстве, необходимую для получения такого же отклонения, что и в п. «а»; в) произвести те же расчеты, что и в пп. «а» и «б», при условии, что напряжение на втором аноде $U_{а2}$ уменьшилось до 900 В.

9.37. Определить напряженность электростатического поля E, в котором сила, действующая на электрон, будет равна силе, действующей на электрон в магнитном поле с индукцией B=100 мкТл, если электрон влетает в поле под углом α=90° относительно магнитных силовых линий с начальной скоростью $v_0=10^4$ м/с.

9.38. К горизонтально отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подводится пилообразное напряжение. Нарисуйте изображение, которое получится на экране.

9.39. Решите предыдущую задачу, если на отклоняющие пластины подается синусоидальное напряжение.

9.40. Исследуемое синусоидальное напряжение имеет период T=100 мкс. Какой должна быть частота непрерывной линейной развертки для получения осциллограммы исследуемого напряжения в пять периодов. Временем обратного хода луча пренебречь.

9.41. Начертить осциллограммы синусоидального напряжения, если развертывающее напряжение имеет форму,

показанную на рис. 9.2,*а* и *б*, а период развертывающего напряжения в 5 раз больше периода исследуемого сигнала: $T_{разв}=5T_{иссл}$.

9.42. Изобразите фигуру, получающуюся на экране электронно-лучевой трубки, если к отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подведены синусоидальные напряжения одинаковой частоты, амплитуды и фазы. Чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин считать одинаковой.

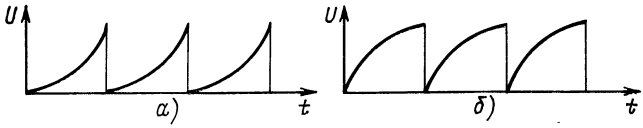


Рис. 9.2.

Решение. Фигуру, которая должна получиться на экране трубки, строим графически. Для этого строим графики изменения синусоидальных напряжений во времени: $U_x=f_1(t)$ и $U_y=f_2(t)$, как показано на рис. 9.3. Затем для различных моментов времени (*1*, *2*, *3* и т. д.) находим отклонение пятна на экране электронно-лучевой трубки и след движения пятна на экране, рисующего фигуру. График показывает, что при заданных условиях на экране

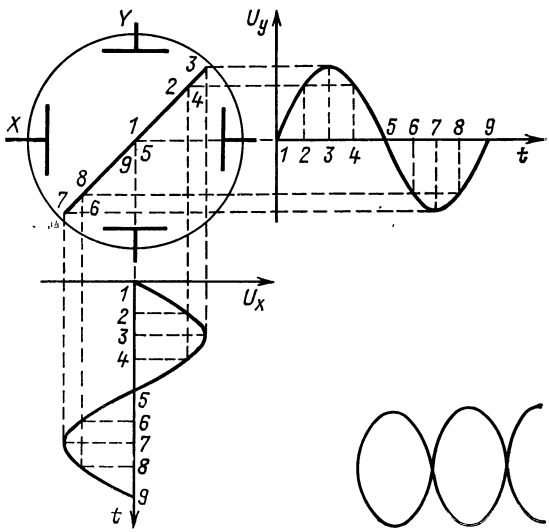


Рис. 9.3.

Рис. 9.4.

трубки получается прямая с углом наклона, равным 45°.

9.43. Решить предыдущую задачу, полагая, что между синусоидальными напряжениями имеется фазовый сдвиг φ, равный: а) $\pi/4$; б) $\pi/2$; в) π.

9.44. Постройте фигуру, которая должна получиться на экране электронно-лучевой трубки, если напряжения, подводимые к ее отклоняющим пластинам, имеют синусоидальную форму, в начальный момент совпадают по фазе и их частоты находятся в отношении $f_y : f_x = 1 : 2$, где f_y — частота отклоняющего напряжения, подведенного к вертикальным пластинам трубки; f_x — частота отклоняющего напряжения, подведенного к горизонтальным пластинам. Считать, что чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин одинакова.

9.45. К горизонтальным пластинам электронно-лучевой трубки приложено отклоняющее переменное напряжение $U_x = A \sin \omega_1 t$, а к вертикальным пластинам — отклоняющее переменное напряжение $U_y = A \sin(\omega_2 t + \varphi)$. Постройте изображения, получаемые на экране, если: а) $\omega_2/\omega_1 = 2$, $\varphi = 0$; б) $\omega_2/\omega_1 = 2$, $\varphi = \pi/2$; в) $\omega_2/\omega_1 = 3$, $\varphi = 0$; г) $\omega_2/\omega_1 = 3$, $\varphi = \pi/2$.

Решить задачу для случаев, когда: а) $\omega_2/\omega_1 = 2/3$, $\varphi = 0$ б) $\omega_2/\omega_1 = 2/3$, $\varphi = \pi/2$. Чувствительность горизонтально и вертикально отклоняющих пластин считать одинаковой.

9.46. Начертить фигуру, наблюдаемую на экране электронно-лучевой трубки, если на вертикально отклоняющие пластины подано отклоняющее синусоидальное напряжение с частотой f, а на горизонтально отклоняющие пластины — пилообразное напряжение с частотой $0{,}8f$. Временем обратного хода луча пренебречь. Считать, что чувствительность по отклонению по осям x и y трубки одинакова.

9.47. Каково соотношение частот напряжений на пластинах X и Y, если на экране видна фигура, изображенная на рис. 9.4?

9.48. На экране электронно-лучевой трубки при временной линейной развертке видно изображение, показанное на рис. 9.5. Определить для этого случая отношение частот исследуемого и развертывающего напряжений.

9.49. В течение какого времени световое пятно электронно-лучевой трубки описывает фигуру, изображенную на рис. 9.6, если напряжение, подводимое к горизонтально отклоняющим пластинам, имеет частоту $f_x = 1{,}5$ кГц?

Решение. Для определения искомого времени сначала найдем соотношение частот отклоняющих напряжений, подводимых к вертикально и горизонтально отклоняющим

пластинам (см. задачу 9.47). Для фигуры на рис. 9.6 соотношение частот $f_y : f_x = 4 : 3$, следовательно, продолжительность образования фигуры будет определяться либо четырьмя периодами вертикально отклоняющего напряжения, либо тремя периодами горизонтально отклоняющего напряжения. При $f_x = 1{,}5$ кГц $T_0 = 3T_x = 3/f_x = 3/1{,}5 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^{-3}$ с $= 2$ мс.

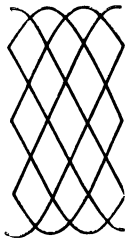


Рис. 9.5.

Рис. 9.6.

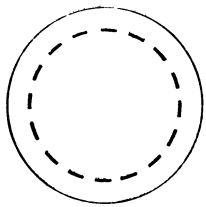


Рис. 9.7.

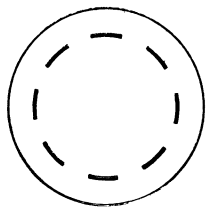


Рис. 9.8.

9.50. На экране электронно-лучевой трубки видна светящаяся вертикальная полоска. Что будет видно на экране, если на модулятор подать переменное напряжение частотой 2 Гц?

9.51. На экране видна окружность, так как на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины подано напряжение одинаковой амплитуды с частотой 50 Гц и сдвигом фаз 90°. Какая фигура будет наблюдаться на экране, если на второй анод, кроме постоянного напряжения, подать переменное напряжение частотой 400 Гц?

9.52. К вертикально и горизонтально отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки подведено синусоидальное напряжение с частотой 250 Гц и сдвигом фаз 90°. Какое изображение получится на экране трубки, если на управляющий электрод подать переменное напряжение частотой 2 кГц?

9.53. Какова частота напряжения, подводимого к отклоняющим пластинам электронно-лучевой трубки, если при подведении к управляющему электроду синусоидального напряжения частотой 4 кГц на экране получилась фигура, изображенная на рис. 9.7?

9.54. Определить частоту напряжения, подводимого к управляющему электроду электронно-лучевой трубки, если на отклоняющие пластины подано синусоидальное напряжение частотой 100 Гц, а изображение, получившееся при этом на экране трубки, показано на рис. 9.8.

9.55. В каких пределах можно измерять амплитудное значение переменного напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки 13ЛО37, если ее чувствительность по отклонению $h'=0{,}43$ мм/В и диаметр экрана $d=13$ см?

9.56. В осциллографе ЭО-6М используется электронно-лучевая трубка типа 8ЛО29, имеющая диаметр $d=8$ см и чувствительность по отклонению $h'=0{,}23$ мм/В. Какое наибольшее по амплитуде импульсное напряжение можно измерять осциллографом ЭО-6М, если подводить его непосредственно к отклоняющим пластинам?

Глава десятая

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

10.1. Цезиевый катод фотоэлемента соединен непосредственно с вольфрамовым анодом. Определить максимальную длину волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента.

10.2. Решить задачу 10.1 при следующих условиях: а) между анодом и катодом включена батарея, создающая ускоряющую разность потенциалов 2 и 10 В; б) между анодом и катодом включена батарея, создающая тормозящую разность потенциалов —2В.

10.3. Вычислить интегральную чувствительность фотоэлемента, если при световом потоке $\Phi=0{,}05$ лм ток фотоэлемента составляет 5 мкА.

10.4. Фотоэлемент цилиндрической конструкции имеет наружный полупрозрачный фотокатод, работающий на просвет, и центральный анод в виде стержня. Диаметр фотокатода 20 мм, диаметр анода 1 мм. Длина каждого электрода равна 20 мм. Интегральная чувствительность фотокатода 30 мкА/лм. Определить минимальное напряжение, при котором все фотоэлектроны доходят до анода, если световой поток, падающий на всю поверхность фотокатода, равен 5 лм.

10.5. На рис. 10.1 изображены вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента СЦВ-3. Для анодного напряжения $U_a=70$ В постройте световую характеристику и определите интегральную чувствительность фотоэлемента.

10.6. Нарисовать схему усилителя фототока и указать основные достоинства и недостатки вакуумных фотоэлементов.

10.7. Будет ли наблюдаться линейность световой характеристики вакуумного фотоэлемента, если он не работает в режиме насыщения? Что такое темновой ток и как следует его учитывать при расчете схем с фотоэлементами?

10.8. Пользуясь семейством электрических характеристик фотоэлемента типа СЦВ-3, построить световые характеристики. Указать рабочую область.

10.9. Объясните, как можно определить интегральную чувствительность фотоэлементов по их спектральным характеристикам и спектральным характеристикам источников излучения.

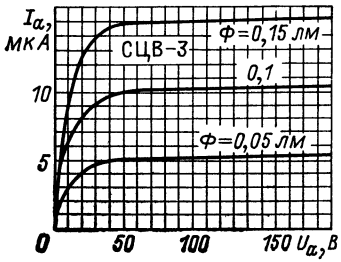


Рис. 10.1.

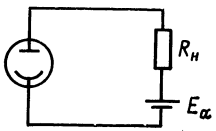


Рис. 10.2.

10.10. Вакуумный фотоэлемент СЦВ-3, вольт-амперные характеристики которого изображены на рис. 10.1, включен в схему, изображенную на рис. 10.2. Нарисуйте графики зависимости фототока от светового потока для трех различных сопротивлений резисторов нагрузки $R_н$=1, 10 и 20 МОм, если напряжение источника $E_а$=200 В.

10.11. Фотоэлемент СЦВ-3, включенный в схему на рис. 10.2, имеет характеристики, изображенные на рис. 10.1. Параллельно с резистором нагрузки включается электронный ключ, обладающий бесконечно большим входным сопротивлением. Напряжение источника $E_а$=200 В. Определить: а) световой поток $Ф$, при котором откроется ключ, если порог срабатывания ключа равен 50 В при сопротивлении нагрузки $R_н$=5 МОм; б) максимально возможное значение сопротивления нагрузки $R_н$, если порог срабатывания равен 100 В и максимальное значение светового потока $Ф$=0,15 лм.

10.12. На сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с интегральной чувствительностью K=100 мкА/лм падает световой поток $Ф$, равный 0,15 лм. Последовательно с фотоэлементом включен резистор сопротивлением R=400 кОм, с ко-

торого сигнал снимается на усилитель, управляющий реле с током срабатывания 10 мА при напряжении 220 В. Определить необходимые коэффициенты усиления по мощности и по напряжению, если входной нагрузкой усилителя является сопротивление R и темновой ток фотоэлемента равен нулю.

Решение. Определяем ток фотоэлемента:

$$I_ф = K_ф Ф = 100 \cdot 0{,}15 = 15 \text{ мкА}.$$

Входная мощность усилителя

$$P_{вх} = I^2 R = (15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 4 \cdot 10^5 =$$

$$= 225 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}.$$

Мощность срабатывания реле

$$P_р = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2{,}2 \text{ Вт}.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = P_р / P_{вх} = 2{,}2 / (9 \cdot 10^{-5}) = 2{,}44 \cdot 10^4.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = U_р / U_R = U_р / (I_ф R) = 220 / (15 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3) = 36{,}7.$$

10.13. Вычислить коэффициент газового усиления плоского газонаполненного фотоэлемента, полагая, что поле между электродами, расположенными на расстоянии 2 см друг от друга, является однородным, а коэффициент ионизации $\alpha = 1{,}1$ см$^{-1}$.

10.14. Определить интегральную чувствительность газонаполненного фотоэлемента ЦГ-1 для световых потоков $Ф = 0{,}01$ и 0,03 лм при напряжениях анода $U_а$: а) 100 В; б) 230 В. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента изображена на рис. 10.3.

10.15. Ионный фотоэлемент ЦГ-1, вольт-амперные характеристики которого изображены на рис. 10.3, включен в схему, приведенную на рис. 10.4. Изобразите графически зависимости фототока от светового потока для различных сопротивлений резисторов нагрузки $R_н = 1{,}25$; 5; 10; 50 и 100 МОм, если напряжение источника $E = 250$ В.

10.16. Ионный фотоэлемент ЦГ-1, вольт-амперные характеристики которого изображены на рис. 10.3, включен в схему на рис. 10.5. Напряжение источника $E_{а1} = 250$ В, сопротивление резистора $R_н = 5$ МОм. Выходной сигнал от фотоэлемента подводится к сетке триода 6С4С. Определить изменение напряжения на нагрузке усилительного

каскада, если световой поток изменяется от 0,01 до 0,03 лм. Триод 6С4С работает в типовом режиме (μ=4,15; R_i=840 Ом). Сопротивление нагрузки в анодной цепи усилителя $R_{н1}$=5 кОм.

10.17 *. Определить число каскадов фотоэлектронного умножителя для получения выходного тока 2 мА, если ток эмиссии фотокатода 0,01 мкА, а коэффициент вторичной эмиссии σ=6.

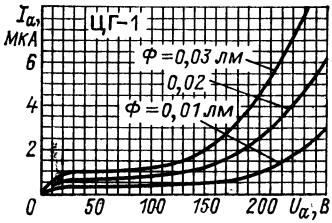


Рис. 10.3.

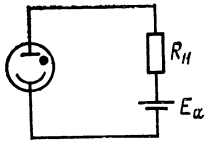


Рис. 10.4.

10.18 *. В девятикаскадном фотоэлектронном умножителе ток эмиссии фотокатода равен 10^{-8} А, а выходной ток составляет 100 мА. Найти коэффициент вторичной эмиссии материала электродов.

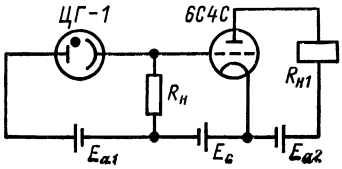


Рис. 10.5.

10.19 *. Определить коэффициент усиления фототока в фотоэлектронном умножителе, если известно, что число эмиттеров в приборе равно 6, коэффициент вторичной эмиссии материала эмиттера σ=4.

10.20 *. Определить коэффициент вторичной эмиссии одного эмиттера фотоумножителя ФЭУ-19, состоящего из 13 каскадов, если известно, что общий коэффициент усиления составляет 10^6.

10.21. Чувствительность фотоэлемента при рабочем анодном напряжении равна 14 мкА/лм, площадь окна фотоэлемента $П$=10 см^2. Горизонтально направленная сила света лампы накаливания равна 100 кд. Определить: а) фототок, если фотоэлемент расположить на расстоянии l=50 см от лампы; б) значение анодного тока, если

* При решении задач 10.17—10.20 рассеянием электронов при расчете пренебречь.

в приборе, помимо указанного фотокатода, будет помещено еще девять эмиттеров, обладающих каждый коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma=5$. Принять, что коэффициент сбора электронов $\alpha=0{,}6$.

10.22. Пользуясь люкс-амперной характеристикой фоторезистора ФСК-1, изображенной на рис. 10.6, определить его удельную чувствительность, если темновой ток $I_т=15$ мкА, освещенность $E=800$ лк, напряжение на фоторезисторе $U=25$ В, площадь светочувствительной поверхности $П=0{,}3$ см^2.

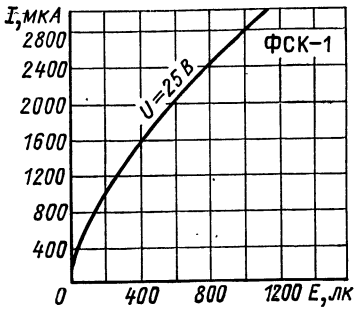


Рис. 10.6.

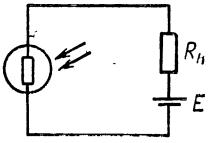


Рис. 10.7.

10.23. Фоторезистор ФСК-1, люкс-амперная характеристика которого изображена на рис. 10.6, используется в схеме на рис. 10.7. Напряжение источника питания $E=50$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_н=10$ кОм, максимально допустимая мощность, рассеиваемая фоторезистором, $P_{max}=125$ мВт. Площадь светочувствительной поверхности $П=0{,}3$ см^2. Определить: а) световой поток $Ф$, при котором падение напряжения на нагрузке $U_R=25$ В; б) мощность P, рассеиваемую фоторезистором в этом случае; в) минимальное значение сопротивления резистора нагрузки $R_{н\,min}$, при котором мощность, рассеиваемая фоторезистором, не превышает максимально допустимую, если значение светового потока $Ф=0{,}03$ лм.

10.24. Нарисуйте и объясните вольт-амперные и световые характеристики фотодиода в фотодиодном режиме. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

10.25. Нарисуйте и объясните характеристики фотодиода в вентильном режиме для нескольких световых потоков. Укажите на характеристиках режимы холостого хода и короткого замыкания. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

10.26. Какими физическими явлениями можно объяснить уменьшение фототока с ростом частоты модуляции светового потока?

10.27. Фотодиод ФД-1, вольт-амперные характеристики которого изображены на рис. 10.8, используется в схеме на рис. 10.9. Напряжение источника равно 100 В. Построить графики зависимости фототока от светового потока при сопротивлениях резисторов нагрузки $R_н$, равных 2 МОм, 100 кОм и 0. Площадь светочувствительной поверхности $П$=5 мм².

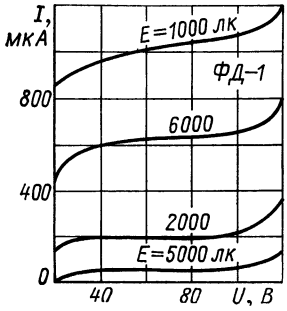


Рис. 10.8.

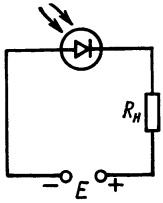


Рис. 10.9.

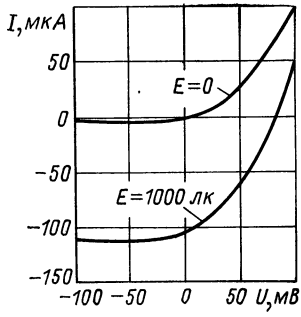


Рис. 10.10.

10.28. По вольт-амперным характеристикам фотодиода ФД-1, изображенным на рис. 10.8, определить предельное значение сопротивления нагрузки, при котором сохраняется еще фотодиодный режим, если напряжение источника питания E=60 В.

10.29. Пользуясь характеристиками фотодиода, работающего в вентильном (фотогальваническом) режиме (рис. 10.10), построить график зависимости выходной мощности от значения сопротивления нагрузки. Найти: а) оптимальное сопротивление нагрузки $R_{н.опт}$; б) напряжение холостого хода U_0.

10.30. Чем ограничена максимальная фото-ЭДС фотодиода, работающего в вентильном режиме?

10.31. Электронно-дырочный переход площадью 10^{-2} см² германиевого фотодиода освещается источником света, который вызывает генерацию носителей заряда со скоростью $4{,}6\cdot10^{18}$ 1/(см³·с). Определить фототок короткого замыкания фотодиода при обратном напряжении, если концентрация примесей в областях p-n-перехода $N_а=N_д=10^{15}$ см⁻³, время жизни носителей τ=10 мкс. Сравните ток короткого замыкания с темновым фототоком при обратном напряже-

нии. Вычислите напряжение холостого хода фотодиода при $T=300$ К.

10.32. Какова связь между интегральными чувствительностями фототранзистора при включении его в схему с общей базой и с общим эмиттером?

Глава одиннадцатая

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

11.1. Потенциал ионизации ртути равен 10,4 В. Определить: а) минимальную скорость электрона, необходимую для ионизации молекулы ртути; б) процент от указанной скорости при ионизации из метастабильного состояния с энергией 4,68 эВ.

11.2. а) Какой минимальной скоростью должен обладать электрон для возбуждения молекулы аргона, имеющей потенциал возбуждения $U_1=11{,}6$ В? Электрон с данной скоростью сталкивается с молекулой ртути и ионизирует ее; потенциал ионизации ртути $U_2=10{,}4$ В. б) Определить скорость бомбардирующего и освобожденного электронов после соударения при условии, что избыточная энергия разделилась поровну между этими частицами.

Решение. а) Кинетическая энергия электрона

$$mv^2_1/2=eU_1,$$

откуда

$$v_1=\sqrt{2\frac{e}{m}U_1}.$$

Подставив числовые данные из условия задачи, получим:

$$v_1=\sqrt{\frac{2\cdot 1{,}602\cdot 10^{-19}\cdot 11{,}6}{9{,}106\cdot 10^{-31}}}=2{,}02\cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

б) Определим избыточную энергию освобожденного электрона:

$$\Delta W=mv^2_1/2-U_2e=9{,}106\cdot 10^{-31}(2{,}02\cdot 10^6)^2/2-$$
$$-1{,}602\cdot 10^{-19}\cdot 10{,}4=1{,}9\cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Поскольку после соударения избыточная энергия разделится поровну между бомбардирующим и освобожденным электронами, то

$$\Delta W=mv^2_2=9{,}106\cdot 10^{-31}v^2_2=1{,}9\cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

откуда

$$v_2=0{,}457\cdot10^6 \text{ м/с}.$$

11.3. а) Определить минимальную скорость, необходимую электрону для того, чтобы ионизировать атом неона, если потенциал ионизации последнего 21,5 В. б) Какое расстояние должен пройти электрон в поле с напряженностью 100 В/см, чтобы приобрести эту скорость?

11.4. Атом ртути находится в метастабильном состоянии с энергией 4,68 эВ. Определить: а) какова длина волны фотона, необходимая для перевода атома в другое метастабильное состояние с энергией 4,86 эВ; б) что произойдет с атомом, если атом затем будет излучать свет длиной волны 0,2537 мкм.

11.5. В некотором газе при температуре $T=20$ °С и давлении $p=267$ Па средняя длина свободного пробега электронов 1 см. Определить среднюю длину свободного пробега при $T=50$ °С и давлении 400 Па.

11.6. Определить: а) среднюю длину свободного пробега молекул в азоте при давлении, равном 0,133 Па, и температуре $T=20$ °С; б) среднюю длину свободного пробега электрона в этом газе. Диаметр молекулы азота равен $3{,}2\cdot10^{-10}$ м.

11.7. Средняя длина свободного пробега электрона в неоне составляет $7{,}9\cdot10^{-4}$ м при $T=300$ К и $p=133$ Па. Определить минимальную напряженность электрического поля, при которой электрон на длине свободного пробега достигнет энергии ионизации неона. Начальную скорость электрона принять равной нулю. Потенциал ионизации неона 21,5 В.

11.8. Напишите выражение для коэффициента первичной ионизации и приведите графики зависимости этого коэффициента от напряженности электрического поля E и давления газа p в баллоне, т. е. $\alpha=f(E)$, $\alpha=f(p)$.

11.9. Определить значение коэффициента вторичной эмиссии γ, соответствующее условию возникновения самостоятельного лавинного разряда в ионном приборе с холодными электродами, если известно, что коэффициент первичной ионизации $\alpha=2$ см$^{-1}$, а расстояние между электродами $d=1{,}5$ см.

11.10. Давление газа в некотором тиратроне с расстоянием между анодом и сеткой $d_{ca}=2$ см равно 0,5 Па. Определить время деионизации при напряжении на сетке тиратрона $U_c=-3$ В и анодном токе $I_a=4$ А. Предположить, что плазма около сетки имеет потенциал, равный 10 В.

Решение. Время деионизации

$$t = \frac{12 \cdot 10^{-5} p I_a^{0,7}}{U^{3/2} d_{ca}},$$

где U — отрицательный потенциал сетки по отношению к окружающему сетку пространству; p — давление газа. Отсюда

$$t = \frac{12 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 4^{0,7}}{(3+10)^{3/2} \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 1,69 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 169 \text{ мкс}.$$

11.11. В разрядной трубке находится некоторый газ под давлением. Электроды расположены на расстоянии 5 мм друг от друга. Трубка помещена в однородное электрическое поле. Было обнаружено, что пробой наступает при 400 В. Определить коэффициент первичной ионизации α и коэффициент умножения β при напряжении 200 В и расстоянии между электродами 2,5 мм в том же самом газе, если коэффициент вторичной эмиссии $\gamma=0,02$.

Решение. При пробое

$$\gamma e^{\alpha d} = 1, \text{ т. е. } 0,02 e^{0,5\alpha} = 1,$$

откуда

$$0,5\alpha = \ln 50,$$

следовательно,

$$\alpha = 7,82 \text{ см}^{-1}.$$

При напряжении $U=200$ В и расстоянии $d=2,5$ мм α сохраняется тем же самым, поскольку напряженность электрического поля неизменна.

Коэффициент умножения

$$\beta = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} = \frac{e^{7,82 \cdot 0,25}}{1-0,02(e^{7,82 \cdot 0,25}-1)} = 8,03.$$

11.12. Нарисуйте график зависимости напряжения возникновения разряда от расстояния между электродами при постоянном давлении. Как изменится вид графика, если давление будет меньше первоначального? Объясните эти зависимости.

11.13. На рис. 11.1 изображены кривые, показывающие зависимость напряжения возникновения разряда $U_{в.р}$ от давления p при различных расстояниях d между электродами. Какая из этих кривых соответствует меньшему расстоянию между электродами?

11.14. Нарисуйте примерный вид вольт-амперных характеристик двух ионных приборов тлеющего разряда,

различающихся только размерами катодов. Поясните эти зависимости.

11.15. Нарисуйте потенциальные диаграммы для произвольно выбранных рабочих точек на вольт-амперных характеристиках приборов самостоятельного и несамостоятельного разрядов и поясните их различия.

11.16. Два ионных прибора тлеющего разряда имеют цилиндрические катоды, выполненные из одинакового материала, длиной 5 и 10 см и диаметром 2 и 4 см соответственно. Ток прибора с катодом меньших размеров изменяется от 5 до 50 мА. Какой максимальный ток можно полу-

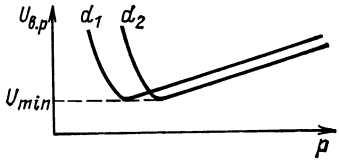


Рис. 11.1.

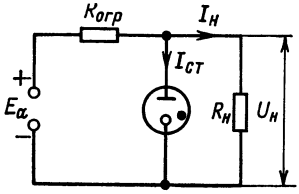


Рис. 11.2.

чить у прибора с катодом больших размеров, если лампы наполнены одним и тем же газом при одинаковых давлениях?

11.17. В стабилитроне тлеющего разряда $I_{ст\,min}$=5 мА, а $I_{ст\,max}$=40 мА. Рассчитать необходимое сопротивление ограничительного резистора, если напряжение на нагрузке $U_н$=150 В, сопротивление резистора нагрузки $R_н$=10 кОм и номинальное значение питающего напряжения в 1,5 раза больше стабилизируемого. Задачу решить для трех случаев: а) напряжение источника питания может как увеличиваться, так и уменьшаться; б) напряжение источника питания может только увеличиваться; в) напряжение источника питания может только уменьшаться.

11.18. Рассчитать сопротивление ограничительного резистора, включенного последовательно со стабилитроном СГ1П (рис. 11.2), если стабилизированное напряжение на нагрузке $U_н$=$U_{ст}$=150 В, сопротивление нагрузки $R_н$=12 кОм, входное напряжение $E_а$=250 В. Определить пределы изменения тока стабилитрона, если сопротивление резистора нагрузки изменяется от 15 до 8 кОм.

11.19. Стабилитрон типа СГ15П включен в схему, изображенную на рис. 11.2, для получения постоянного выходного напряжения. Подаваемое напряжение остается постоянным, равным $E_а$=250 В, а ток нагрузки изменяется

от 40 до 60 мА. Определить сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, при котором напряжение на нагрузке было бы постоянным и равным 108 В. Проверить, будет ли обеспечена стабилизация напряжения на всем диапазоне изменения тока нагрузки.

11.20. Стабилитрон СГ1П включен в схему стабилизации напряжения (рис. 11.2). Ток нагрузки $I_н$=10 мА, напряжение на входе $E_а$=250 В. Определить аналитическим и графическим способами значение ограничительного со-

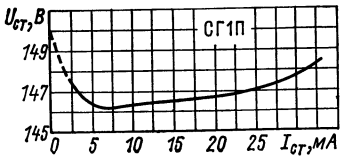


Рис. 11.3.

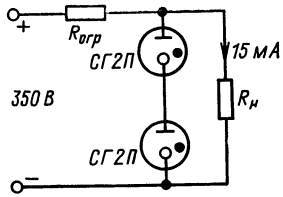


Рис. 11.4.

противления и допустимое изменение входного напряжения $E_а$ при условии сохранения постоянства $U_{ст}$ (использовать весь рабочий участок характеристики стабилитрона, изображенной на рис. 11.3).

11.21. Для стабилитрона, описанного в предыдущей задаче, определить сопротивление стабилитрона постоянному току при протекающих через него токах 10, 20, 30 мА, а также дифференциальное сопротивление при токе $I_{ст}$= =20 мА.

11.22. Два стабилитрона типа СГ2П, включенные последовательно (рис. 11.4), используются для получения постоянного напряжения $U_{ст}$=216 В. Входное напряжение $E_а$=350 В. Определить сопротивление ограничительного резистора $R_{огр}$, если номинальный ток нагрузки равен 15 мА.

11.23. Схема, изображенная на рис. 11.5, используется для стабилизации напряжений на 108 и 216 В. Определить максимальный ток, который может проходить по нагрузке $R'_н$, включенной между средней точкой и отрицательным зажимом. Напряжение стабилизации считать постоянным.

11.24. Источник питания имеет напряжение E=345± ±50 В. Необходимо получить стабильное напряжение 200 В на нагрузке $R_н$=4 кОм, если имеются стабилитроны СГ2П с напряжением стабилизации $U_{ст}$=108 В и током 5—30 мА. Составить схему стабилизации и рассчитать ее элементы.

11.25. Стабилитрон СГ1П используется в простейшей схеме генератора пилообразных напряжений (рис. 11.6).

Определить амплитуду пилообразного напряжения, сопротивление резистора нагрузки $R_н$, емкость конденсатора C в цепи заряда и разряда, если напряжение на входе $E_а$=250 В, а период нарастания пилообразного напряжения $\tau_п$=120 мкс. Напряжение погасания взять равным $0{,}1U_{в.р}$.

11.26. Начертите и поясните основные статические характеристики тиратронов с токовым и электростатическим управлением.

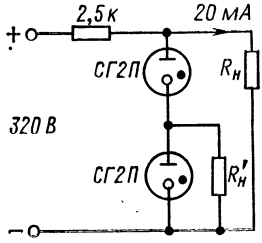


Рис. 11.5.

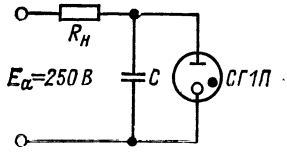


Рис. 11.6.

11.27. Начертите и поясните основные динамические характеристики тиратронов тлеющего разряда: входные динамические характеристики, характеристики запаздывания зажигания разряда в цепи анода, деионизационные характеристики.

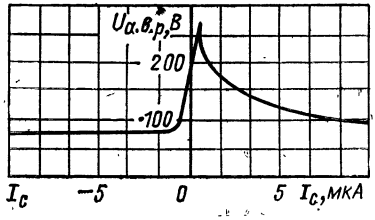


Рис. 11.7.

11.28. По пусковой характеристике тиратрона МТХ-90 (рис. 11.7) определить чувствительность $h=dU_{а.в.р}/dI_с$ на крутом и пологом участках и сеточный ток возникновения разряда при $U_а$=150 В.

11.29. Тиратрон тлеющего разряда МТХ-90 имеет следующие данные: $U_{а.в.р}$=140 В при $I_с$=5 мкА; $U_{а.раб}$=60 В; $U_{с.в.р}$=80 В; $U_{с.раб}$=50 В. Определить сопротивление резистора нагрузки в анодной цепи $R_н$, сопротивление ограничительного резистора в цепи сетки $R_{с.огр}$ и входное напряжение, если ток в анодной нагрузке $I_а$=20 мА, напряжение источника питания анодной цепи $E_а$=140 В.

11.30. Тиратрон тлеющего разряда ТХ4Б работает при напряжении анодного источника $E_а$=225 В, при напряжении сеточного источника $E_с$=60 В и при токе первой сетки $I_с$=10 мкА. Начертите его пусковые характеристики и определите по ним минимальную амплитуду запускающего импульса.

11.31. Нарисуйте принципиальную схему генератора пилообразных колебаний на неоновой лампе. Нарисуйте график изменения напряжения на конденсаторе для двух значений зарядного сопротивления.

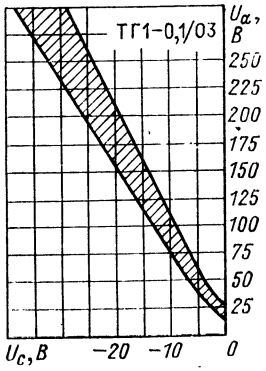


Рис. 11.8.

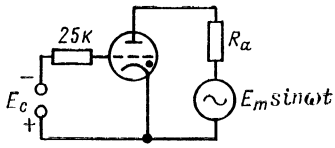


Рис. 11.9.

11.32. Генератор пилообразных колебаний на неоновой лампе имеет сопротивление зарядного резистора R=2 МОм, емкость конденсатора C=0,01 мкФ, потенциал зажигания (возникновения разряда) $U_{в.р}$=87 В, потенциал погасания $U_п$=80 В, напряжение источника питания E=110 В. Определить амплитуду и частоту колебаний.

11.33. Пользуясь пусковой характеристикой тиратрона дугового разряда ТГ1-0,1/0,3 (рис. 11.8), определить: а) минимальное напряжение на сетке, при котором произойдет зажигание тиратрона, если напряжение анода $U_а$=250 В; б) ширину пусковой области при анодном напряжении $U_а$=175 В; в) в какую сторону сместится пусковая область при увеличении сопротивления резисторов в цепи сетки?

11.34. Поясните, как и почему изменяются значения сеточного и анодного токов тиратрона при постоянном значении отрицательного напряжения на сетке и постоянной нагрузке, но при разных значениях $E_а$.

11.35. До каких предельных частот можно использовать тиратрон? Чем ограничивается возможность использования тиратронов на высоких частотах?

11.36. Тиратрон дугового разряда имеет напряжение возникновения разряда 100 В и горит под напряжением 15 В при анодном токе 20 мА. Определить сопротивление ограничительного резистора в анодной цепи.

11.37. Тиратрон дугового разряда работает в схеме, изображенной на рис. 11.9. Пусковая характеристика тиратрона задана следующими значениями:

U_c, В	0	—2,5	—5	—7,5	—10
U_a, В	20	50	100	200	400

Напряжение источника анодного питания $E_a=200\sin\omega t$, рабочее напряжение на тиратроне равно 20 В, сопротивление резистора нагрузки в анодной цепи $R_a=1{,}8$ кОм. Построить временные диаграммы $I_a=f_1(t)$; $U_R=f_2(t)$; $U_a=f_3(t)$ при $U_c=-5$ и $-7{,}5$ В.

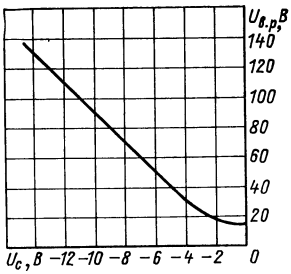


Рис. 11.10.

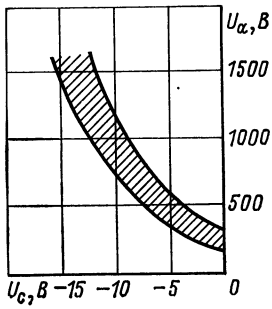


Рис. 11.11.

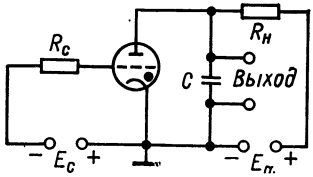
11.38. На сетку тиратрона подается постоянное напряжение —6В. Определить угол управления, если к аноду тиратрона подводится синусоидальное напряжение с амплитудным значением 100 В и частотой 50 Гц. Пусковая характеристика тиратрона изображена на рис. 11.10.

11.39. Тиратрон, пусковая характеристика которого изображена на рис. 11.11, работает в схеме, приведенной на рис. 11.9. Сопротивление резистора нагрузки $R_a=100$ Ом, подводимое напряжение $500\sin\omega t$, напряжение смещения $E_c=-5$ В. Предполагается, что после возникновения разряда падением напряжения между анодом и катодом можно пренебречь. Рассчитайте постоянную составляющую анодного тока, предполагая, что потенциал зажигания может изменяться в области, указанной на рис. 11.11.

11.40. Тиратрон ТГ1-0,1/1,3 имеет наибольшую амплитуду анодного тока 0,5 А и наибольшее среднее значение анодного тока 0,1 А. Определить наибольший угол управления, если через сопротивление нагрузки течет постоянный ток, равный предельному.

11.41. Тиратрон работает в однополупериодной схеме выпрямителя. Нарисовать временные диаграммы анодного напряжения и анодного тока тиратрона для трех значений угла управления: —120, 0 и 120°. Падением напряжения

Рис. 11.12.



на тиратроне после возникновения разряда пренебречь и считать, что потенциал возникновения разряда U_c для всех значений анодного напряжения равен нулю.

11.42. Пользуясь пусковыми характеристиками тиратрона дугового разряда ТГ1-0,1/0,3 (см. рис. 11.8), постройте область его динамических пусковых характеристик (зависимости напряжений сетки, при которых возникает разряд, от времени), если к аноду подводится переменное синусоидальное напряжение с амплитудой 250 В. Поясните причины, приводящие к образованию такой области.

11.43. Анодное напряжение тиратрона типа ТГ1-0,1/0,3 изменяется по закону $U_а=10^4t$, В. Пользуясь пусковой характеристикой тиратрона, определить постоянное напряжение на сетке, если разряд в тиратроне возникает через 0,005 с от момента нулевого напряжения.

11.44. Тиратрон дугового разряда используется в простейшей схеме генератора релаксационных колебаний, изображенной на рис. 11.12. Напряжение источника питания $E_а=500$ В, емкость конденсатора $C=0{,}01$ мкФ, сопротивление резистора нагрузки $R_н=50$ кОм. Определить частоту генератора, если напряжение возникновения разряда тиратрона $U_{в.р}=225$ В и напряжение погасания $U_п=10$ В.

11.45. В анодную цепь тиратрона включен источник напряжения $U=160\sin 100\pi t$. На сетку тиратрона подано постоянное напряжение —9 В. С помощью пусковой характеристики (см. рис. 11.10) тиратрона определить, в течение какого промежутка времени (в пределах одного периода переменного напряжения) через тиратрон будет протекать ток.

11.46. Определите значение предельной частоты переменного тока, при котором можно использовать тиратрон дугового разряда в схемах выпрямления, если время деионизации газа в баллоне лампы τ=250 мкс.

11.47. На рис. 11.8 приведена пусковая характеристика тиратрона ТГ1-0,1/0,3. По этой характеристике определите минимальное напряжение на аноде, при котором произойдет зажигание тиратрона, если на сетку тиратрона подано напряжение U_c=—10 В. Укажите, как будут изменяться анодный и сеточный токи, если после зажигания тиратрона изменить напряжение на сетке от —10 до 2 В.

11.48. Определить сопротивление резистора R_a в схеме выпрямления, собранной на тиратроне ТГ1-0,1/0,3, если известны значение среднего анодного тока I_a=5 мА и амплитуда синусоидального переменного напряжения источника питания анодной цепи, равная 130 В. Пусковая характеристика приведена на рис. 11.8. Напряжение на сетке U_c=—6 В.

11.49. Пользуясь пусковой характеристикой тиратрона ТГ1-0,1/0,3 (см. рис. 11.8), подберите электрические режимы схемы управляемого выпрямителя и определите пределы регулирования значения выпрямленного напряжения, соответствующие выбранным режимам, если анодная цепь питается от сети переменного тока напряжением E=127 В (50 Гц), сопротивление анодной цепи R_a=5 кОм. Сеточная цепь также питается от сети переменного тока через трансформатор и фазовращатель.

11.50. Определите разбежку тиратрона ТГ1-0,1/0,3, работающего в схеме управляющего выпрямителя, и напряжение на сетке, соответствующее номинальному значению среднего анодного тока. Пусковая характеристика тиратрона дана на рис. 11.8; R_c=0,1 МОм, R_a=2,5 кОм, U_c= =—20 В. Значение изменения предразрядного тока ΔI_c= =30 мкА.

Глава двенадцатая

ШУМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

12.1. Какие причины вызывают появление собственных шумов в электронной лампе ? Каков частотный спектр шума анодного тока?

12.2. Напишите уравнения основных шумовых параметров электронной лампы и поясните физический смысл каждого из них. Каков порядок их значений?

12.3. Каково влияние плотности объемного заряда на уровень шума электронной лампы?

12.4. Какова физическая природа шумов мерцания оксидных катодов? В каком частотном диапазоне они имеют наибольшую интенсивность?

12.5. Найти действующее значение шумовой ЭДС $E_ш$, возникающей в проводнике вследствие тепловых флуктуаций электронного потока при T=300 К. Сопротивление проводника равно 10 Ом, рассматриваемая ширина частотного спектра составляет 1 кГц.

12.6. Определите значение шумового тока в диоде в режиме насыщения, если известно, что анодный ток $I_а$=10 мА, а полоса пропускания усилителя равна 10 кГц.

12.7. Определить шумовое напряжение $U_ш$ и шумовое сопротивление $R_ш$ триода, работающего без сеточных токов, если анодный ток триода $I_а$=7 мА, крутизна характеристики S=5 мА/В, диапазон усиливаемых частот 20 Гц—20 кГц. Коэффициент депрессии F^2=0,02.

12.8. Крутизна триода S=5 мА/В. Между катодом и сеткой включен резистор с сопротивлением 300 Ом, который охлаждается до температуры T=200 К. При этой температуре уровень шумов резистора оказывается равным уровню дробовых шумов лампы. Определить коэффициент депрессии F^2, если анодный ток $I_а$ триода равен 10 мА.

12.9. Определить шумовое сопротивление ламп 6Ж5П, 6Ж45Б-В, работающих в типовом режиме.

12.10. Даны две лампы (триод и пентод), имеющие одинаковые значения крутизны S=4,5 мА/В и анодного тока $I_{а10}$=7 мА. Вычислить эквивалентное шумовое сопротивление обеих ламп, если ток экранирующей сетки пентода $I_{с20}$=2 мА. Объясните различие полученных результатов.

12.11. Определить эквивалентное шумовое сопротивление диода в области начальных токов при температуре катода T=1000 К.

12.12. Вычислить наименьший полезный сигнал, который может быть обнаружен на резисторе нагрузки детектирующего диода. Анодный ток $I_а$=1 мА, сопротивление нагрузки диода $R_н$=10^5 Ом. Диод работает в режиме насыщения. Полоса пропускания усилительного тракта Δf==10 кГц. Рабочие частоты около 10^7 Гц. Считать, что наименьший полезный сигнал равен шумам. Температура резистора T=300 К.

12.13. В цепи вакуумного фотоэлемента с кислородно-цезиевым фотокатодом включен резистор нагрузки сопротивлением $R_н$=1 МОм. Сравнить уровни дробового и теплового шумов, выделенных на этом резисторе. Условия

работы фотоэлемента: $\Phi=0{,}02$ лм, $П=25$ см^2, $T=300$ К, $\Delta f=1$ Гц, чувствительность по току $K_i=20$ мкА/лм, $j_{тэ}=10^{-12}$ А/см^2.

12.14. Определить уровень фотонного шума, ограничивающий порог чувствительности идеального термического индикатора. Принять температуры приемника и фона одинаковыми и равными 300 К, $П=1$ мм^2, $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon=1$ и $\Delta f=1$ Гц.

12.15. Что является источником тепловых шумов в биполярном транзисторе? Напишите уравнение для среднеквадратического значения напряжения тепловых шумов в транзисторе.

12.16. Какие физические процессы определяют дробовой шум в биполярном транзисторе? Напишите выражения для среднеквадратического значения шумового тока в цепях эмиттер — база и эмиттер — коллектор.

12.17. Каково происхождение избыточного шума в транзисторах? В каком диапазоне частот в основном проявляется избыточный шум биполярных транзисторов?

12.18. Определить значение избыточного шума в полупроводниковом приборе в полосе частот 50—5000 Гц.

12.19. Что называется коэффициентом шума транзистора? Как изменяется коэффициент шума транзистора: а) при изменении тока эмиттера; б) при изменении обратного напряжения на коллекторном переходе?

12.20. У транзистора при токе эмиттера $I_э=1$ мА и и $T=300$ К распределенное сопротивление базы $r'_б=200$ Ом, коэффициент передачи тока базы $h_{21э}=50$. Сопротивление источника сигнала $R_г=600$ Ом. Определить: а) коэффициент шума транзистора; б) оптимальное сопротивление источника сигнала.

12.21. У транзистора при $T=300$ К на частоте 1 кГц низкочастотный коэффициент шума $K_{ш.н.ч}=20$. Найти напряжение шума, приведенное ко входу, в диапазоне 20—20 000 Гц, если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=600$ Ом.

12.22. Транзистор при токе эмиттера $I_э=1$ мА и $T=300$ К имеет следующие значения параметров: $r_э=20$ Ом, $r'_б=200$ Ом, $I_{КБ0}=10$ мкА, $h_{21э}=49$. Определить шумовое сопротивление, шумовую проводимость и коэффициент шума транзистора, если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_г=500$ Ом.

12.23. Какие физические явления определяют тепловой шум канала полевого транзистора? Зависит ли тепловой шум канала от напряжений на электродах транзистора?

12.24. Каковы причины возникновения шумов затвора в полевых транзисторах с управляющим *p-n*-переходом и МДП-транзисторах?

12.25. Какие физические явления определяют избыточный шум в транзисторах с управляющим *p-n*-переходом и МДП-транзисторах? Какова зависимость избыточного шума транзисторов от частоты?

12.26. Что понимается под надежностью электронных приборов?

12.27. Что такое отказ? Какие виды отказов существуют у электровакуумных приборов?

12.28. Как изменяется интенсивность отказов во времени и чем объясняется наличие трех периодов? Как определяется интенсивность отказов электронных приборов? Почему интенсивность отказов возрастает при эксплуатации электронных приборов в режимах, близких к предельным?

12.29. Какие параметры электронных приборов используются в качестве критериев долговечности при оценке применимости приборов в аппаратуре и прогнозировании выхода приборов из строя? Какие особенности присущи надежным и долговечным электронным приборам?

12.30. Каковы причины снижения срока службы катодов при эксплуатации их в условиях повышенного нагрева?

12.31. Как изменится интенсивность отказов электровакуумного прибора, если он будет работать при напряжении накала на 20% выше номинального? Интенсивность отказов при номинальном напряжении накала равна $\lambda = 2\cdot10^{-5}$ 1/ч.

Решение. При расчете воспользуемся формулой

$$\lambda_н = 0{,}4\,\lambda_{н.н} + 0{,}6\,\lambda_{н.н}(U_н/U_{н.н})^{12},$$

где $\lambda_н$ — интенсивность отказов при данном напряжении накала; $\lambda_{н.н}$ — интенсивность отказов при номинальном напряжении накала; $U_н$ — данное напряжение накала; $U_{н.н}$ — номинальное напряжение накала.

Формула справедлива при $U_н \geqslant U_{н.н}$.

Подставляя числовые значения, данные в условии задачи, получаем:

$$\lambda_н = 0{,}4\cdot2\cdot10^{-5} + 0{,}6\cdot2\cdot10^{-5}(1{,}2/1)^{12} = 1{,}15\cdot10^{-4}\ 1/ч;$$

тогда

$$\lambda_н/\lambda_{н.н} = 1{,}15\cdot10^{-4}/(2\cdot10^{-5}) = 5{,}7.$$

Следовательно, интенсивность отказов увеличится в 5,7 раза.

12.32. В чем состоят основные правила эксплуатации катодов? Какие причины могут привести к внезапному отказу катода при эксплуатации электровакуумных приборов? Каковы особенности эксплуатаци мощных катодов?

12.33. Какое влияние на срок службы прибора оказывает эксплуатация прибора при повышенных напряжениях на аноде и других электродах?

12.34. Как изменится интенсивность отказов электронной лампы, если она будет работать при анодном напряжении на 20% выше номинального? Считать, что интенсивность отказов при номинальном анодном напряжении равна $\lambda_{а.н}=1\cdot10^{-5}$ 1/ч.

Решение. Воспользуемся формулой

$$\lambda_а=\lambda_{а.н}(U_а/U_{а.н})^{1,75},$$

где $\lambda_а$ — интенсивность отказов при данном анодном напряжении; $\lambda_{а.н}$ — интенсивность отказов при номинальном анодном напряжении; $U_а$ — данное анодное напряжение; $U_{а.н}$ — номинальное анодное апряжение.

Формула справедлива при $U_а \geqslant U_{а.н}$.

Подставляя числовые значения, данные в условии задачи, получаем:

$$\lambda_а=1\cdot10^{-5}(1,2/1)^{1,75}=1,4\cdot10^{-5}\ 1/ч;$$

тогда

$$\lambda_а/\lambda_{а.н}=1,4\cdot10^{-5}/(1\cdot10^{-5})=1,4.$$

Следовательно, интенсивность отказов увеличится в 1,4 раза.

12.35. Каковы особенности эксплуатации электронных приборов в непрерывном и импульсном режимах?

12.36. Как влияет влажность окружающей среды на надежность электровакуумных и полупроводниковых приборов?

12.37. Как влияет температура окружающей среды на надежность электровакуумных и полупроводниковых приборов?

12.38. Какое влияние на работу электронных приборов оказывает изменение давления окружающей среды?

12.39. Как влияют на надежность и срок службы электровакуумных и полупроводниковых приборов механические нагрузки?

12.40. Какие виды отказов существуют у полупроводниковых приборов? Дайте определение каждого вида отказов.

12.41. Какие схемные мероприятия следует предусматривать, чтобы исключить или уменьшить катастрофические отказы полупроводниковых приборов?

12.42. Какие меры следует принимать, чтобы предупредить возникновение постепенных параметрических отказов полупроводниковых приборов?

12.43. Что определяет конец срока службы транзистора (для усилителя малого и большого сигналов и в переключательных схемах)?

12.44. Как определяется коэффициент нагрузки для транзистора?

12.45. Как влияет технология изготовления на надежность транзистора и почему планарный кремниевый транзистор имеет наивысшую надежность по сравнению с транзисторами других типов?

12.46. Что делается при проектировании радиоэлектронной аппаратуры для защиты электронного прибора от воздействия факторов, которые могут снизить работоспособность прибора или даже вывести его из строя?

12.47. Сформулируйте основные требования, которые необходимо выполнить, чтобы обеспечить надежную работу аппаратуры на полупроводниковых приборах.

12.48. Каков порядок включения выводов электродов электронных приборов в цепи источников питания?

12.49. В каком порядке выключается электронный прибор?

12.50. В чем состоят особенности включения и выключения мощных электронных приборов?

12.51. Каковы основные правила обращения с электронными приборами?

Часть вторая

ОТВЕТЫ

Глава первая

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

1.1. $5{,}93\cdot10^5$ м/с; $1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж.

1.4. а) $8{,}6\cdot10^{-10}$ с; б) $4{,}3\cdot10^{-3}$ м; в) 285 В; г) на $27{,}5\cdot10^{-17}$ Дж.

1.5. —45,5 В.

1.6. а) $v=v_0+eUt/md$; $x=v_0t+eUt^2/(md^2)$;

б) $t=(-v_0\pm\sqrt{v_0^2+2ad})/a$; в) $U=2v_0^2/(e/m)$.

1.7. а) $t_{AB}\approx3{,}37\cdot10^{-9}$ с; $t_{BC}\approx1{,}12\cdot10^{-9}$ с; $v_B\approx5{,}93\cdot10^6$ м/с; $v_C=1{,}2\times\times10^7$ м/с; б) $t_{AB}=4{,}37\cdot10^{-9}$ с, $t_{BC}=2{,}3\cdot10^{-9}$ с; $v_B\approx6{,}5\cdot10^6$ м/с; $v_C=1{,}06\cdot10^7$ м/с.

1.8. $U=7{,}2\cdot10^4$ В.

1.9. $1{,}19\cdot10^7$ м/с; 18 мм; $3{,}02\cdot10^{-9}$ с.

1.10. а) $6{,}7\cdot10^{-3}$ м; б) $6{,}4\cdot10^{-9}$ с; в) $8\cdot10^{-18}$ Дж; г) $4{,}8\cdot10^{-17}$ Дж.

1.11. а) $13{,}3\cdot10^6$ м/с; $8\cdot10^{-17}$ Дж; б) $3\cdot10^{-9}$ с.

1.12. а) Электрон достигнет верхней пластины; б) $5{,}93\cdot10^6$ м/с; в) $3{,}43\cdot10^{-9}$ с; г) максимальная энергия электрона до изменения знака потенциала $4\cdot10^{-17}$ Дж; энергия, отданная электроду, $1{,}6\times\times10^{-17}$ Дж.

1.14. Энергия 100,8 эВ, достаточная для выбивания вторичных электронов.

1.15. а) $v_{T/2}=8{,}8\cdot10^4$ м/с; $s_{T/2}=2{,}2\cdot10^{-4}$ м; $v_T=0$; $s_T=4{,}4\cdot10^{-4}$ м; б) электрон закончит свой путь на пластине B.

1.16. а) На второй пластине; б) $6{,}24\cdot10^{-17}$ Дж.

1.17. Расстояние, пролетаемое электроном, определяется выражением $s=2{,}93\cdot10^{17}t^3$; через 0,1 мкс электрон пройдет путь $0{,}293\cdot10^{-3}$ м; электрон ударяется о верхнхю пластину со скоростью $9{,}25\cdot10^4$ м/с.

1.19. 3 мм; —1 В; $6{,}8\cdot10^{-9}$ с.

1.21. а) $4\cdot10^{-10}$ с; б) $7{,}94\cdot10^6$ м/с; $2{,}87\cdot10^{-17}$ Дж.

1.22. 6°.

1.23. 121 В.

1.24. $7{,}5\cdot10^6$ м/с.

1.25. $2{,}2\cdot10^{-25}$ кг.

1.26. $v=\sqrt{2a\ln\frac{x}{r}}$, где $a=\frac{eU}{m\ln(R/r)}$.

1.27. а) $1{,}07\cdot10^{-2}$ м; б) $4{,}6\cdot10^{-1}$ м.

1.28. 13°40′.

1.30. 12,5°; 2,23 мм.

1.31. 10°; 30,4 мм.

1.32 $1{,}86\cdot10^{-4}$ Тл.

1.33. 8,8 В, $2{,}8\cdot10^{7}$ об/с.

1.34. а) 1,07 см; б) винтовая линия радиусом 0,093 см с шагом 6 см.

1.35. $3{,}1\cdot10^{-3}$ Тл.

1.36. 13,5 мм.

1.37. а) 2,69 см; $7{,}15\cdot10^{-9}$ с; б) винтовая линия радиусом 1,35 см с шагом 14,6 см.

1.38. 45°.

1.39. $3{,}37\cdot10^{-3}$ Тл; $1{,}6\cdot10^{-8}$ с.

1.40. 1,14 мм.

1.42. $4{,}47\cdot10^{-2}$ м; $5{,}34\cdot10^{-4}$ Тл.

1.43. а) $3\cdot10^{7}$ м/с; б) $1{,}76\cdot10^{11}$ Кл/кг.

1.44. $4{,}15\cdot10^{5}$ эВ.

1.45. 712 В.

1.47. Циклоида.

1.49. а) $4{,}8\cdot10^{-3}$ Тл; б) $4{,}2\cdot10^{6}$ м/с.

1.51. 5120 В; $9{,}44\cdot10^{6}$ В.

1.52. $9{,}18\cdot10^{19}$ В.

1.53. Протон.

1.54. 3,12 МэВ, 5,72 ГэВ; импульсы $1{,}92\cdot10^{-21}$ кг·м/с, $9{,}52\cdot10^{-18}$ кг·м/с.

1.55. $\Delta v_x/v_0=-5{,}9\cdot10^{-3}$.

1.56. $2{,}55\cdot10^{5}$ В.

1.57. $3{,}28\cdot10^{-2}$ Тл.

1.58. $R_{\text{электрона}}=21{,}8$ мм; $\tau_{\text{электрона}}=4{,}59\cdot10^{-10}$ с; $R_{\text{протона}}=28{,}7$ см; $\tau_{\text{протона}}=4{,}14\cdot10^{-8}$ с.

1.59. $1{,}4\cdot10^{-2}$ Тл.

1.60. $R=Em/(eB^2)$. Электрон не достигнет верхней пластины, если расстояние между пластинами $d>2R$. Условием обратного возвращения электрона на отрицательно заряженную пластину служит неравенство $B>\sqrt{\frac{2Em}{ed}}$. При соблюдении этого условия электрон попадет на отрицательно заряженную пластину в точке, отстоящей от точки вылета на расстоянии $l=2\pi R=2\pi Em/(eB^2)$.

1.61. а) Трохоида в плоскости xz; б) $Z_{max}=5{,}7\cdot10^{-9}$ м; в) $v=500$ м/с; г) $\omega=1{,}76\cdot10^{11}$ рад/с.

1.63. $0{,}4\cdot10^{-4}$ м.

1.64. Траектория движения — трохоида в направлении оси Oy, $l=1{,}76\times\times10^{-4}$ м; $z_{max}=2{,}3\cdot10^{-4}$ м.

1.65. Растянутая трохоида, $z_{max}=1{,}8\cdot10^{-5}$ м.

1.66. Сжатая трохоида, $z_{max}=2{,}7\cdot10^{-5}$ м.

1.67. а) Траекторией движения будет циклоида:

$$x=\frac{v_0m}{eB}\sin\frac{eB}{m}t+\frac{Em}{eB^2}\left[\frac{eB}{m}t\sin\frac{eB}{m}t\right];$$

$$y=-\frac{v_0m}{eB}\left[1-\cos\frac{eB}{m}t\right]+\frac{Em}{eB^2}\left[1-\cos\frac{eB}{m}t\right];$$

б) $v_0=E/B$; в) $t=2\pi m/(eB)$.

1.68. $4\cdot10^{-3}$ Тл.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ. КАТОДЫ

2.1. $\frac{h^2}{2m}\left(\frac{3N}{8\pi}\right)^{2/3}=36{,}4$ эВ.

2.2. 2,2 эВ.

2.3. $2{,}17\cdot10^6$ м/с.

2.4. $1/e=0{,}368$.

2.5. 0,206 эВ.

2.6. а) 0,5 эВ; б) 1,7 эВ.

2.7. $A\approx13{,}1\cdot10^{-3}$ А/(см^2·град^2); $b_0\approx11\,960$ град.

2.8. $33{,}3\cdot10^6$ В/м; 0,22 эВ.

2.10. $0{,}84\cdot10^{-7}$ м.

2.11. $6{,}05\cdot10^6$ В/м; $2{,}98\cdot10^6$ В/м.

2.12. 0,131 эВ.

2.14. 0,218 эВ.

2.15. 3,15 эВ.

2.16. 54,7 К.

2.17. 0,013 эВ; на 48%.

2.18. $4{,}3\cdot10^8$ В/см.

2.20. 70 мА; на 300%.

2.23. $П_W:П_{Th}:П_{окс}=5{,}73\cdot10^3:10{,}2:1$.

2.24. $П_W:П_{Th}:П_{окс}=1{,}63\cdot10^{14}:7{,}3:1$.

2.25. 21,8 мА.

2.27. а) 0,54 А; б) 1810 К.

2.36. Подогреватели ламп соединяются последовательно, но параллельно подогревателю лампы, имеющей ток накала 0,3 А, надо включить резистор с сопротивлением 40 Ом.

2.37. Да.

2.38. Цезий.

2.39. $6{,}13\cdot10^{-7}$ м.

2.40. а) 2,11 эВ; $3{,}25\cdot10^5$ м/с; б) 2,95 эВ; $6{,}33\cdot10^5$ м/с; в) 4,87 эВ; $10{,}37\cdot10^5$ м/с.

2.41. $7{,}52\cdot10^5$ м/с.

2.42. $13{,}52\cdot10^5$ м/с.

2.43. 1,032 эВ.

2.44. Из цезия; $v_{max}=3\cdot10^5$ м/с.

2.45. Для кальция $5{,}42\cdot10^{14}$ Гц; для углерода $9{,}68\cdot10^{14}$ Гц; для цезия $4{,}38\cdot10^{14}$ Гц; для молибдена $10{,}73\cdot10^{14}$ Гц; для никеля $6{,}71\times\times10^{14}$ Гц; для платины $12{,}3\cdot10^{14}$ Гц; для тантала $9{,}85\cdot10^{14}$ Гц; для тория $8{,}11\cdot10^{14}$ Гц; для вольфрама $10{,}92\cdot10^{14}$ Гц.

2.46. 0,685 мкм.

2.47. 0,726 мкм.

2.48. 931,1 км/с..

2.49. $1{,}9\cdot10^{-15}$ А.

2.50. 1,26 В.

2.51. $46{,}3\cdot10^{-8}$ см.

2.52. а) 7616 эВ; б) на конечном.

2.53. 470 эВ.

2.54. 30 В.

Глава третья

ДИОДЫ

3.21. $U_а=\dfrac{kT}{e}\ln\dfrac{I_а}{I_э}=-0{,}198$ В.

3.22. $I_а=860$ мА.

3.23. а) 159 В; б) 56,6 мА; в) 160 мА.

3.24. 10,3 В.

3.25. Анодный ток второго диода в 1,82 раза больше тока первого диода.

3.26. а) 21,8 мА; б) 40 мА.

3.27. $k=9\cdot10^{-6}$; $n=1{,}52$.

3.28. 2540 В.

3.29. 32 В.

3.37. 18,4%.

3.38. $\dfrac{I_{эE}}{I_э}=e^{4{,}4\sqrt{E_к}/T}=e^{4{,}4\sqrt{3107}/1000}=1{,}28,$

где $E_к=\dfrac{U_а}{r_к\ln(r_а/r_к)}=\dfrac{1000}{0{,}2\ln(1/0{,}2)}=3107$ В/см.

3.39. $S=2$ мА/В; $R_i=500$ Ом.

3.40. $S=3{,}7$ мА/В; $R_i=270$ Ом; $R_0=405$ Ом.

3.42. а) R_0=1 кОм; R_i=667 Ом; S=1,5 мА/ В; б) R_0=1,42 кОм; R_i=0,946 кОм; S=1,1 мА/В.

3.43.

Параметр	Напряжение анода, В				
	1	4	7	10	30
R_0, кОм	3,86	2,31	1,88	1,65	1,1
R_i, кОм	2,57	1,54	1,25	1,1	0,73

3.44. При $U_а$=4 В, $I_а$=4 мА, S=1,5 мА/В, R_0=1 кОм, R_i=667 Ом; при $U_а$=25 В $I_а$=62,5 мА, S=3,75 мА/В, R_0=400 Ом, R_i=267 Ом.

3.45.

Параметр	Напряжение анода, В				
	4	8	16	24	32
S, мА/В	2	2,5	4	5	8
R_0, Ом	667	534	382	316	266
R_i, Ом	500	400	250	200	125

3.46. S=0,018 мА/В; R_0=—66,7 кОм; R_i=55,6 кОм. $8{,}75\cdot10^{13}$ электронов/с, $5{,}93\cdot10^5$ м/с.

3.51. 2 Вт.

3.52. 403 В.

3.53. 16 мА.

3.55. 120 В.

3.56. 4 кОм.

3.58. При $E_а$=60 В $I_а$=130 мА, $U_а$=34 В, U_R=26 В; при $E_а$=80 В $I_а$=180 мА, $U_а$=43 В, U_R=37 В; при $E_а$=120 В $I_а$=305 мА, $U_а$=59 В, U_R=61 В.

3.59. При $E_а$=200 В, $R_а$=4 кОм $I_а$=330 мА, $U_а$=63 В, U_R=137 В; при $E_а$=100 В, $R_а$=500 Ом $I_а$=440 мА, $U_а$=77 В, U_R=23 В; при $E_а$=200 В, $R_а$=200 Ом $I_а$=550 мА, $U_а$=90 В, U_R=110 В.

3.60. При $R_а$=400 Ом $I_а$=155 мА, $U_а$=39 В, U_R=61 В, $P_а$=5,88 Вт; при $R_а$=200 Ом $I_а$=247 мА, $U_а$=51 В, U_R=49 В, $P_а$=12,6 Вт; при $R_а$=0 $I_а$=630 мА, $U_а$=100 В, U_R=0, $P_а$=63 Вт (превышает предельную, режим работы не допустим!).

3.64. 63 мА; 20 В.

3.65. 3,2 мА.

3.66. 8 мкА; —0,3 В.

3.77. На частоте 400 Гц $X_C=1/(2\pi fC)=100$ МОм и шунтирующее влияние емкости практически отсутствует. На частоте 400 МГц $X_C=$ $=100$ Ом и емкость сильно шунтирует диод.

Глава четвертая

ТРИОДЫ

4.3. а) Точка *3*; б) точка *1*.

4.5. Указание. Действующее напряжение триода $U_д$ рассчитывается по формуле $U_д=(U_c+DU_a)/(1+D+D')$, где D — прямая проницаемость; D' — обратная проницаемость. Поскольку D и D', как правило, значительно меньше единицы, то практически $U_д\approx U_c+$ $+DU_a$. Для данной задачи $U_д$ равно —2, —1, 0 В.

4.8. Указание. Для нахождения анодного тока при отрицательных напряжениях сетки можно воспользоваться приближенной формулой $I_a=I_к\cong 2{,}33\cdot 10^{-6}[П_a/(r_{ск}r_{ак})](U_c+DU_a)^{3/2}$. Используя эту формулу, вначале следует построить характеристику $I_к=f(U_a)$ при $U_c=0$. Затем эту характеристику следует смещать вправо на U_c/D в соответствии с заданными значениями сеточного напряжения.

4.18. $S=3{,}2$ мА/В; $R_i=12{,}5$ кОм; $\mu=40$.

4.20. 1,66 В.

4.21. На 200 В.

4.22. $S=1{,}6$ мА/В; $R_i=12{,}5$ кОм; $\mu=20$.

4.26. $I_a=2{,}25$ мА; $S=1{,}57$ мА/В; $R_i=11{,}8$ кОм.

4.27. $S=2{,}8$ мА/В; $R_i=15{,}2$ кОм; $\mu=42{,}5$.

4.28. $S=3$ мА/В; $R_i=7$ кОм; $\mu=21$.

4.29. $S_{экв}=7{,}5$ мА/В; $R_{i\,экв}=4{,}45$ кОм; $\mu_{экв}=33{,}4$.

4.30. а) 0,75 В; б) 27 В.

4.31. а) 140 и 175 В; б) 7 кОм.

4.32. а) 2 В; б) 3,75 мА/В.

4.33. б) 60 В; в) 30.

4.34. $S\approx 3{,}75$ мА/В; $R_i\approx 8$ кОм; $\mu\approx 30$.

4.35. $S\approx 3{,}25$ мА/В; $R_i\approx 7{,}8$ кОм; $\mu\approx 25$.

4.36.

Параметр	Напряжение анода, В			
	100	150	200	250
S, мА/В	2,25	3,6	4,1	4,6
R_0, кОм	25	15	11,4	10
R_i, кОм	10	7,9	7,3	6,4
μ	23	28	30	30

4.37.

Параметр	Напряжение управляющей сетки, В			
	—2	—3	—3,5	—4,5
S, мА/В	5,35	4	3,26	1,5
R_0, кОм	11,7	20,6	30	80
R_i, кОм	4,65	5,35	6,9	11,7
μ	25	25	22	20

4.38. 12,5 кОм.

4.39. 240 В.

4.40. а) μ=22,4; $U_{с.зап}\approx$—9 В; б) на 44,8 В.

4.41. а) R_i=5 кОм; μ=25; б) на 4 В влево.

4.42. а) S=3 мА/В; R_i=10 кОм; б) 300 В.

4.43. а) S=2 мА/В; R_i=10 кОм; б) 40 В.

4.44. а) $U_{с.зап1}$=—4 В; $U_{с.зап2}$=—6 В; б) 2 В.

4.45. На 72 В.

4.46. а) $U_{с.зап1}$=—2 В; $U_{с.зап2}$=—20 В; б) в 10 раз.

4.54.

а)

Искомые величины	Сопротивление нагрузки $R_а$, кОм			
	5	10	25	50
$I_{а0}$, мА	18,5	13	7	4
$U_{а0}$, В	207,5	170	125	100
U_{R0}, В	92,5	130	175	200

б) 10,7 кОм.

4.58. $I_{а0}$=3,2 мА; I_{ma}=1,7 мА; $U_{а0}$=110 В;
U_{ma}=34 В; $P_{вых}$=28,9 мВт; $P_а$=176 мВт.
Режим работы допустим.

4.59.

Искомые величины	Сопротивление нагрузки $R_а$, кОм			
	0	5	10	15
$U_{а0}$, В	100	85	80	70
U_{R0}, В	0	15	20	30
I_{ma}, мА	6,8	2,4	1,5	1,1
$\lvert K\rvert$	0	12	15	16,5

4.60. а) 25 МВт; б) 140 мВт; в) 295 МВт; г) 460 мВт; д) 5,4%.

4.61. $P_{вых}$=27 мВт; P_{R0}=186 мВт; $P_а$=532 мВт; P_0=745 мВт; η=
=3,6%

4.62. а) 66,7; 53; 25,6 и 13,6 мВт; в) 15 кОм.

4.65. Указания. 1. Для получения наибольшего усиления по напряжению и малых искажений следует провести линию нагрузки (выбрать ее наклон) так, чтобы длина горизонтального катета в треугольнике полезной мощности была по возможности большей. Для выполнения этого условия наклон линии должен быть меньшим, что будет соответствовать включению большего сопротивления нагрузки $R_а$. На практике берут обычно $R_а=(3\div4)R_i$.

2. Рабочий участок определяется из условия получения на выходе неискаженного сигнала (см. решение задачи 4.63).

3. Построение рабочей анодно-сеточной характеристики можно осуществить путем переноса точек пересечения рабочей анодной характеристики со статическими характеристиками, снятыми при определенных значениях сеточного напряжения. Эти точки переносят на плоскость анодно-сеточных характеристик, где по оси абсцисс отложены напряжения сетки.

4.66. а) 5 мА; б) 5,2 мА; в) 52 В; г) $P_{вых}=0{,}13$ Вт; $P_0=0{,}7$ Вт; $P_а=0{,}57$ Вт; д) 13; 18,6%.

Указание. Для постоянной составляющей анодного тока, когда переменное сеточное напряжение равно нулю, сопротивление нагрузки $r_{др}=0$, поэтому по постоянному току лампа работает в режиме без нагрузки. Следовательно, рабочей точке должно соответствовать напряжение $E_а$, а не $U_{а0}=E_0-I_{а0}R_а$, т. е. рабочая точка должна находиться на прямой, параллельной оси ординат, исходящей из точки с координатами $I_а=0$, $U_а=E_а$. Точка пересечения этой прямой с характеристикой, снятой при напряжении сетки $U_с=E_с$, определяет положение рабочей точки.

Для переменного тока сопротивление нагрузки равно $R_а$ (индуктивное сопротивление $\omega L_{др}=\infty$), поэтому нагрузочная анодная характеристика для переменного тока должна проходить через рабочую точку под углом $\alpha=\mathrm{arctg}(m/n)R_а$ (где m и n — масштабные коэффициенты по осям тока и напряжения) к оси абсцисс. Для построения нагрузочной прямой рекомендуется вначале из точки с координатами $I_а=0$, $U_а=E_а$ провести вспомогательную прямую, которая пересекла бы ось ординат в точке $I_а=E_а/R_а$. Затем через рабочую точку нужно провести прямую, параллельную вспомогательной. Эта прямая и будет искомой нагрузочной анодной характеристикой.

Существует другой способ построения нагрузочной прямой. Так как лампа работает в режиме нагрузки только по переменному току, то в основном уравнении для рабочего режима вместо тока $I_а$ следует учитывать только переменную составляющую анодного тока $\Delta I_а$, поскольку нагрузочное сопротивление имеется только для нее, т. е. $U_а=E_а-\Delta I_а R_а$.

Положив $\Delta I_а=0$, получим $U_а=E_а$. Точка пересечения вертикальной прямой, исходящей из точки с координатами $U_а=E_а$, $I_а=0$, с характеристикой, снятой при $U_с=E_с$, определяет поло-

жение рабочей точки T, которая соответствует току покоя I_{a0}. Вторую точку нагрузочной прямой найдем, положив $U_a=0$. Тогда $\Delta I_a=E_a/R_a$. Отложив это значение от уровня тока I_{a0}, получим вторую точку рабочей анодной характеристики.

Через эти точки проводим прямую, которая и будет являться рабочей анодной характеристикой. Дальнейший расчет ведется обычным способом.

4.69. При $U_c>0$ $U_{mc}=5$ В; при $U_c<0$ $U_{mc}=4{,}96$ В.

4.73. $I_{a0}=4{,}4$ мА; $U_{a0}=96$ В; $E_c=-2{,}2$ В.

4.74. а) 6,7 мА; б) 0,5 мА.

4.75. 47.

4.76. 33,6 кОм.

4.77. а) 48; б) 12 кОм.

4.78. а) 50 кОм; б) 1 мА/В.

4.79. а) 75; б) 25 кОм; в) —60.

4.80. $S=6$ мА/В; $R_i=6$ кОм; $\mu=36$.

4.81. а) $\leqslant 208$ Ом.

4.84. а) 1,8 мА; б) 43,2 В; в) 39 мВт; г) —28,8.

4.85. $U'_{ma}=9{,}5$ В; $P_{вых}=6{,}7$ мВт; $U''_{ma}=18{,}8$ В; $P_{вых}=9$ мВт; б) 6,5 кОм.

4.86. а) 13,3 кОм; б) 254 В; в) 0,69; г) 2,76 В; д) 1,24 В.

4.88. а) $I_{a0}=7{,}5$ мА; $U_{a0}=210$ В; б) $I_{a0}=12$ мА; $U_{a0}=145$ В.

4.89. а) 9,5 мА; б) —24.

4.94. $\theta=79°13'$; $I_{amax}=16$ мА; $I_{ma}=9{,}8$ мА.

4.97. 54,5 пФ.

4.99. 2 и 0,2 В.

4.100. а) $Y_{11}=j1{,}62\cdot10^{-3}$ См; $Y_{12}=j0{,}487\cdot10^{-3}$ См; $Y_{21}=(6\cdot10^{-3}-j0{,}487)$ См; $Y_{22}=(0{,}166\cdot10^{-3}+j1{,}147\cdot10^{-3})$ См; б) 206 мкА; в) $|k|=5{,}14$; $\varphi=-84°30'$.

4.101. а) —139 кОм; б) 72 пФ.

4.102. $19\cdot10^8$ Ом и $19\cdot10^2$ Ом.

4.103. 0,30 МГц.

4.104. 0,36 МГц.

4.105. 14,4.

Глава пятая

МНОГОСЕТОЧНЫЕ ЛАМПЫ

5.2. $U_{c1зап}=-16{,}3$ В; $U_д=13{,}3$ В.

5.3. —5,25 В.

5.19. Параметры тетрода: $S=4{,}6$ мА/В; $R_i=27$ кОм; $\mu=124$; параметры тетрода в триодном включении: $S=3{,}9$ мА/В; $R_i=2{,}3$ кОм; $\mu=8{,}8$.

5.20. $S=30$ мА/В; $R_i=3$ кОм; $\mu=90$; $P_a=63$ Вт; $P_{c2}=0{,}17$ Вт.

5.27. 90 В.

5.28. а) Уменьшится на 20 В, т. е. на 20%; б) уменьшится на 1 В, т. е. на 1,25%.

5.29. а) Возрастет; б) U_{c20} будет иметь небольшое отрицательное значение; в) при обрыве в цепи R_1 значения параметров μ, R_i уменьшаются, а S и D — увеличиваются; при обрыве в цепи R_2, μ и R_i увеличиваются, а S и D уменьшаются.

5.30. R_1=62,5 кОм; R_2=25 кОм.

5.33. а) 1,7 мА; б) 3,4 мА/В; в) 100.

5.34. Да.

5.35. а) I_{a0}=52 мА; U_{a0}=142 В; U_{R0}=108 В; б) I_{ma}=30 мА; U_{ma}=60 В; в) $P_{вых}$=0,9 Вт; P_{R0}=5,6 Вт; P_{a0}=7,4 Вт; P_0=13 Вт; г) K=—7,5; $S_{раб}$=4,2 мА/В; д) 5,4%.

5.36. а) $R_{а.опт}$=12 кОм; б) I_{a0}=14,3 мА; U_{a0}=146 В; U_{R0}=160 В; в) I_{ma}=8,2 мА; U_{ma}=98,5 В; г) $P_{вых}$=405 мВт; P_0=4,6 Вт; P_{a0}=2,1 Вт<P_{amax}=3,3 Вт; д) K=—98,5; $S_{раб}$=8,3 мА/В; е) 9%.

Указания. 1. В задаче требуется подобрать оптимальное сопротивление нагрузки, т. е. такое сопротивление, при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность при минимальных нелинейных искажениях. В подобных случаях линию нагрузки следует провести так, чтобы рабочая точка делила рабочий участок пополам, т. е. чтобы гипотенузы треугольников полезной мощности были одинаковыми.

2. Расчет всех заданных величин в условии задачи проводится аналогично расчету рабочего режима триода.

5.37. а) —103; б) —100. Ошибка примерно 3%.

5.39. Указание. См. указание к задаче 4.66.

5.41. 110 Ом.

5.42. $R_к$=1 кОм; R_{c2}=900 кОм.

5.43. а) 3; б) 40, 12 и 4 В.

5.44. В 20 раз.

5.45. а) I_a=1,35 мА; S=2,25 мА/В.

5.46. а) 45 мВ; б) 1,1%.

5.47. а) —20; б) 4 мА/В; в) 24 мА; г) 1,44 Вт.

5.48. а) 11 мА/В; б) 22 мА; в) 0,11 В.

5.49. а) 1200; б) —129.

5.50. Для триода U_{mc}=19,6 В; для пентода U_{mc}=1,43 В.

5.51. 280

5.52. а) Для триода $|K|$=38: для тетрода $|K|$=262; для пентода $|K|$=309, б) для триода R_a=2,1 кОм; для тетрода R_a=15 кОм; для пентода R_a=150 кОм.

5.53. $C_{вх}$=18 пФ; $X_{C\,вх}$=442 Ом; $C_{вых}$=21 пФ; $X_{C\,вых}$=380 Ом.

5.54. 6,25 пФ.

5.55. 50 пФ.

5.56. $X_{вх} = \dfrac{1}{\omega\,[C_{ск} + C_{ас}\,(1+K)]} = 152$ Ом.

5.57. 50 мВ.

5.58. 795 кГц; 100 кОм; 200.
5.59. 394 мкСм.
5.62. а) 0,15 мА/В; б) 0,22 мА/В; в) 11; г) 0,22 мкА; 11 мВ.
5.63. а) 0,25 мА/В; б) S=1,75 мА/В; R_i=11 кОм; μ=18,7.
5.64. 12.

Глава шестая

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

6.1. а) 10^{-60}; б) 10^{-6}; в) примерно 0,0318.
6.2. а) 10^{-6}; б) $10^{-9,3}$; в) 10^{-47}.
6.7. На $\frac{3}{4}kT\ln\left(\frac{m^*_n}{m^*_p}\right)=13,5\cdot10^{-3}$ эВ ниже середины запрещенной зоны.
6.8. $E_g\approx1,0$ эВ; уровень Ферми расположен на 0,5 эВ ниже дна зоны проводимости.
6.9. $6,12\cdot10^{-6}$; $3,05\cdot10^{-7}$; $1,26\cdot10^{-14}$.
6.11. На 0,196 эВ выше середины запрещенной зоны.
6.12. На 0,229 эВ ниже дна зоны проводимости.
6.13. На 0,416 эВ ниже середины запрещенной зоны.
6.14. На 0,16 эВ ниже дна зоны проводимости.
6.15. На 0,0668 эВ ниже дна зоны проводимости.
6.16. Уровень Ферми сместится к середине запрещенной зоны и будет отличаться от нее на 0,05 эВ. $n_p=2,25\cdot10^{-4}$ см$^{-3}$.
6.17. На 0,256 эВ ниже дна зоны проводимости.
6.18. а) На 0,041 эВ выше дна зоны проводимости; б) $8,84\cdot10^{18}$ см$^{-3}$.
6.19. На 0,279 эВ выше потолка валентной воны.
6.20. а) На 0,0179 эВ ниже потолка валентной зоны; б) $2,5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$.
6.21. $6,33\cdot10^{18}$ см$^{-3}$.
6.24. а) $n_i = p_i = \frac{2\,(2\pi kT)^{3/2}}{h^3}\,(m^*_n m^*_p)^{3/4}\,e^{-\frac{E_g}{2kT}} \approx 10^{10}$ см$^{-3}$;
б) $n_n=5\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; $p_n=2\cdot10^2$ см$^{-3}$.
6.25. $n_p=6,25\cdot10^{12}$ см$^{-3}$; $p_p=10^{14}$ см$^{-3}$.
6.26. а) 43,2 Ом·см; б) 3,64 Ом·см.
6.27. а) $3,29\cdot10^5$ Ом·см; б) 8,93 Ом·см.
6.28. а) 8 Ом·см; б) $5,7\cdot10^{15}$ см$^{-3}$; в) $13,4\cdot10^{-6}$%.
6.29. 44,7 Ом·см и $44,7\cdot10^{-4}$ Ом·см.
6.30. 16 Ом·см и $16\cdot10^{-4}$ Ом·см.
6.31. 125 Ом·см и $1,25\cdot10^{-2}$ Ом·см.
6.32. $\sigma\approx eN_a\mu_p=0,608$ См/см.
6.33. 0,14 и $1,4\cdot10^{-3}$ Ом·м.
6.34. $5,39\cdot10^{19}$ электронов/м^3; $0,99\cdot10^{19}$ дырок/м^3.
6.35. $1,47\cdot10^{16}$ м$^{-3}$; 0,74
6.36. $2,15\cdot10^{11}$ м$^{-3}$; $0,76\cdot10^{-10}$.
6.39. 0,4 Ом·см.

6.40. $6{,}25\cdot10^{10}$ см$^{-3}$.
6.42. $8\cdot10^{-5}$ См/см.
6.44. $1{,}08\cdot10^{13}$ см$^{-3}$.
6.45. а) $3{,}29\cdot10^{12}$ см$^{-3}$; б) $7{,}48\cdot10^{-11}$; в) $2{,}05\cdot10^{-3}$ См/см.
6.46. $p_p=3{,}29\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; $n_p=1{,}9\cdot10^{9}$ см$^{-3}$.
6.47. $p_n=2{,}24\cdot10^{5}$ см$^{-3}$; $n_n=4{,}47\cdot10^{14}$ см$^{-3}$.
6.50. $0{,}93\cdot10^{10}$ см$^{-3}$; $1{,}64\cdot10^{13}$ см$^{-3}$; $0{,}87\cdot10^{15}$ см$^{-3}$.
6.54. 0,67 эВ.
6.55. На 16 К.
6.56. Примерно на 18%.
6.57. На 34,3%.
6.58. При 1430 К.
6.59. Средняя скорость электронов равна 390, $39\cdot10^{2}$ и $39\cdot10^{3}$ м/с. средняя скорость дырок равна 190, $19\cdot10^{2}$ и $19\cdot10^{3}$ м/с.
6.60. Средняя скорость электронов равна 140, $14\cdot10^{2}$ и $14\cdot10^{3}$ м/с. средняя скорость дырок равна 50, 500 и 5000 м/с.
6.61. $3{,}9\cdot10^{3}$ м/с; $5{,}93\cdot10^{6}$ м/с.
6.63. 1,04 кОм.
6.64. 524 А/м^2.
6.65. 0,576 А.
6.66. $2{,}5\cdot10^{-6}$ с.
6.67. 25 см/с; 70 см/с.
6.68. $8\cdot10^{-2}$ А.
6.69. а) 2,05; б) 2,8; в) 337; г) $2{,}23\cdot10^{9}$; д) $2{,}96\cdot10^{-3}$.
6.70. 36,1 см^2/с; 12,9 см^2/с.
6.71. $p_n=6{,}25\cdot10^{9}$ см$^{-3}$; $L_n=7{,}1\cdot10^{-2}$ см.
6.72. $\tau_n=242$ мкс; $\mu_n=3600$ см^2/(В·с).
6.73. 400 мкс; 462 см^2/(В·с).
6.74. $L_n=21\cdot10^{-2}$ см; $D_n=93$ см^2/с.
6.75. $\mu_n=1200$ см^2/(В·с).
6.76. Увеличится на 15%.
6.77. Увеличится на 8,9%.
6.78. $7{,}9\cdot10^{3}$ А/м^2.
6.79. $L_n=\sqrt{D_n\tau_n}=\sqrt{(\mu_n kT/e)\,\tau_n}=0{,}1$ см.
6.80. $2{,}6\cdot10^{-3}$ А/см^2; $1{,}7\cdot10^{-2}$ см.
6.81. а) $4{,}5\cdot10^{3}$; б) $6{,}5\cdot10^{-4}$ м; в) 104 А/м^2.
6.82. $0{,}68\cdot10^{-4}$ м.
6.88. а) $2\cdot10^{-3}$ м^3/Кл; б) отрицательный; в) $3{,}31\cdot10^{21}$ м$^{-3}$; г) 0,36 м^2/(В·с).
6.89. $2\cdot10^{22}$ м$^{-3}$; 0,035 м^2/(В·с).
6.90. 1,1°.
6.92. $1{,}16\cdot10^{21}$ м$^{-3}$; 0,36 м^2/(В·с).
6.93. $1{,}6\cdot10^{22}$ м$^{-3}$; 0,0414 м^2/(В·с).
6.94. 1,83 мВ.

Глава седьмая

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

7.2. 0,745 В.
7.4. 0,679 В.
7.9. 0,8 В.
7.10. 0,51 мкА.
7.11. а) 0,44 В; б) $4\cdot10^7$ А/см^2.
7.12. а) 0,3 В; б) 0,51 мкА; в) 98%.
7.13. а) При прямых напряжениях $1{,}7\cdot10^{12}$; $4{,}62\cdot10^{12}$; $3{,}41\cdot10^{13}$ см$^{-3}$; при обратных напряжениях $2{,}3\cdot10^{11}$; $8{,}46\cdot10^{10}$; $1{,}14\cdot10^{10}$; б) 127 мВ; в) 0,552 См/м.
7.14. а) $I_p/I_n=28{,}8$; б) 1,05 мкА/м^2; 0,081 А/м^2.
7.15. $2{,}7\cdot10^{-13}$ А; $2{,}1\cdot10^{-12}$ А.
7.18. 9 мкА.
7.19. 10 мкА.
7.20. а) 0,23 В; б) 0,58 В.
7.25. $21{,}8\cdot10^7$.
7.26. $I=1$ мА при $U=0{,}137$ В; $I=10$ мА при $U=0{,}196$ В. Уточненные результаты: $I=1$ мА при $U=0{,}157$ В; $I=10$ мА при $U=0{,}398$ В.
7.27. а) 3,1 мкА; б) 0,15 В.
7.28. 0,359 В.
7.29. 77 мкс.
7.31. Дрейфовая электронная составляющая.
7.32. n-область.
7.33. Увеличивается.
7.34. $N_а=1{,}6\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; $N_д=1{,}6\cdot10^{15}$ см$^{-3}$.
7.35. Области n.
7.37. 0,118 В.
7.38. а) 0,018 В; б) 0,12 В.
7.42. 1,83 мм.
7.44. $r_{диф.пр}=0{,}4$ Ом; $R_{диф.обр}=890$ Ом.
7.45. $r_{диф.пр}=3{,}5$ Ом; $R_{диф.обр}=380$ кОм.
7.48. $\varphi_к=0{,}67$ В; $C_{min}=0{,}75$ пФ.
7.50. Примерно 71 пФ.
7.52. Примерно 44,7 пФ.
7.53. а) ~114 пФ; б) 29 пФ; ~21 пФ.
7.54. а) $1{,}33\cdot10^{-4}$ см и $7{,}76\cdot10^{-4}$ см; б) $7{,}68\cdot10^{-5}$ см; в) 107 и 18,3 пФ.
7.55. 0,36 мм.
7.56. а) 186,8 раза; б) $7{,}2\cdot10^{-6}$ А/см^2.
7.57. а) 10^{24}, 10^{22}, 10^{16}, 10^{14}; б) $3{,}2\cdot10^4$ См/см, $6{,}4\cdot10^2$ См/см; в) 0,46 В; г) 0,005 м^2/с, 0,01 м^2/с; д) 0,04 мкА; е) 0,88 мА; ж) 0,04 мкА; з) 1,4 мкм; и) 100 пФ; к) 50/1.
7.58. а) 0,7 мкм; б) $2{,}86\cdot10^7$ В/м; в) 270 пФ; г) 99,6 В.
7.59. а) 1,6 мкм; б) $9{,}65\cdot10^6$ В/м; в) 311 пФ; г) 120 В.
7.60. 0,4 мм; 12 кВ.

7.61. а) 78 пФ, б) $4{,}2\cdot10^7$ В/м.
7.62. 450 Ом.
7.63. а) 10 мкА; б) 1,43 Ом; в) $6\cdot10^{19}$ Ом.
7.64. $R_{0\,пр}=200$ Ом; $R_{0\,обр}=4\cdot10^5$ Ом.
7.65. $r_{диф.пр}=10$ Ом; $r_{диф.обр}=250$ кОм.
7.67. а) $R_{0\,пр}=0{,}08$ Ом; $r_{диф.пр}=0{,}03$ Ом; $r_{диф.обр}=20$ кОм; б) при $U_{пр}=0{,}2$ В R_0 уменьшается в 1,66 раза, $r_{диф}$ — в 6,66 раза; при $U_{обр}=25$ В R_0 уменьшается в 11,3 раза.
7.68. 9,82 мА; 0,18 В.
7.70. 60 мкФ; 0,243 В.
7.71. $r_{диф}=0{,}1$ Ом; $R_s=1$ Ом; $C_д=920$ мкФ.
7.72. $R_i=1{,}67$ Ом; $C_д=6$ мкФ.
7.73. 136 мкм; 103 пФ.
7.74. 1 Ом; 6,4 мкФ.
7.81. $I_д=0{,}7$ мА; $U_д=1{,}2$ В; $U_{R_н}=0{,}8$ В.
7.85. При $R=10$ МОм $U_д\approx1$ В, $I_д\approx2{,}8$ мкА; при $R=1$ МОм $U_д\approx17$ В; $I_д=15$ мкА; при $R=100$ кОм $U_д\approx27{,}8$ В, $I_д=20$ мкА.
7.88. а) $I_{д1}\approx10$ мА, $I_{д2}=0$; б) $I_{д1}\approx53{,}8$ мА; $I_{д2}=45$ мА.
7.89. $K_в=330$; $I_0=30\cdot10^{-6}$ А.
7.90. 50 мА; 20 Ом.
7.93. 6 В.
7.94. 200 Ом.
7.101. Д814В; $R_{огр}=160$ Ом.
7.102. $U_{ст}=8{,}3$ В; $I_{ст}=9$ мА; $R_0=920$ Ом, $r_{диф}=50$ Ом; ТКН= =0,1%/град.
7.104. $R_{min}=256$ Ом; $R_{max}=1$ кОм.
7.106. а) $I_{д1}=I_{д2}=0{,}6$ мкА, $U_{д1}=60$ В; $U_{д2}=30$ В; б) $I_{д1}=I_{д2}=$ $=0{,}734$ мкА, $U_{д1}=73{,}3$ В, $U_{д2}=36{,}7$ В.
7.107. а) $I_{д1}=0{,}467$ мкА, $U_{д1}=46{,}7$ В, $I_{д2}=0{,}867$ мкА, $U_{д2}=43{,}3$ В; б) $I_{д1}=0{,}572$ мкА, $U_{д1}=57{,}2$ В, $I_{д2}=1{,}06$ мкА, $U_{д2}=52{,}8$ В.
7.108. 3,75 кОм; 35 мА.
7.109. От 162,5 до 294 В.
7.110. 0,05%/град.
7.111. $I_0=1{,}17$ мА.
7.113. Переход ступенчатый, $\varphi_к=0{,}9$ В, следовательно, переход кремниевый
7.118. $f_{пред}=62$ МГц, $\theta_в=90$, $\Delta C=7$ пФ.
7.119. $l_n=l_p=8{,}1\cdot10^{-7}$ см; $\varphi_к=1{,}01$ В; $E_{max}=1{,}24\cdot10^6$ В/см.
7.120. а) 0,748 В; б) $7{,}75\cdot10^{-7}$ см.
7.121. а) 1,16 В; б) $80{,}12\cdot10^{-8}$ см.
7.124. Указание. При последовательном соединении двух диодов через оба диода будет протекать один и тот же ток, а приложенное напряжение будет равно сумме напряжений на каждом диоде. Поэтому суммарная вольт-амперная характеристика находится путем сложения напряжений (при данном значении тока), определяемых по характеристикам диодов. Другими словами, для

каждого определенного значения I необходимо сложить абсциссы $U_{д1}$ и $U_{д2}$ (поскольку $U=U_{д1}+U_{д2}$).

7.125. Указание. В этой схеме зависимость общего тока I и напряжения на диоде $U_д=U$ находится путем сложения значений токов (при данном значении напряжения), определяемых по характеристикам диодов. Для каждого определенного значения U необходимо сложить ординаты: $I_{д1}+I_{д2}$, так как $I=I_{д1}+I_{д2}$.

7.133. $f_{пред}=1$ ГГц; $r_{диф}=15$ Ом; $R_s=0{,}65$ Ом; $\tau_{пред}=1{,}7\cdot10^{-9}$ с.

Глава восьмая

ТРАНЗИСТОРЫ

8.3. +12,5 В.

8.4. —9,2 В.

8.5. а) Вывод A соединен с коллектором, B — с базой, C — с эмиттером; б) 50.

8.24. $I_Э=-0{,}144$ мкА; $I_К=1{,}54$ мкА.

8.26. 5,9 мкА.

8.27. а) $I_Э=-10^{-8}$ А; $I_К=11\cdot10^{-8}$ А; $I_Б=-12\cdot10^{-8}$ А;

б) $I_Э=21{,}6$ мА; $I_К=+21{,}4$ мА; $I_Б=+0{,}2$ мА;

в) $I_Э=18{,}6$ мА; $I_К=+18$ мА; $I_Б=+0{,}6$ мА.

8.28. $I_К=4{,}78$ мкА; $I_Э=0{,}227$ мкА.

8.29. а) $I_Э=-58{,}7$ мкА; $I_К=-57{,}5$ мкА; б) 0,11 В.

8.30. 0,6 А; кремниевый.

8.32. Примерно 1,3 мА.

8.33. $\alpha=0{,}98$, $h_{21Э}=50$, $I_{КЭ0}=5{,}1\cdot10^{-7}$ А.

8.34. 18,9 В.

8.35. 7,3 мкм.

8.36. 0,9 мкс.

8.37. 81.

8.40. а) $\varphi_{к\,эб}=0{,}59$ В; $\varphi_{к\,кб}=0{,}55$ В; б) $U_{ЭБ}=0{,}51$ В.

8.41. $\alpha\approx1$ (0,9995).

8.42. $dw/dU_{КБ}=-4{,}4\cdot10^{-5}$ см/В.

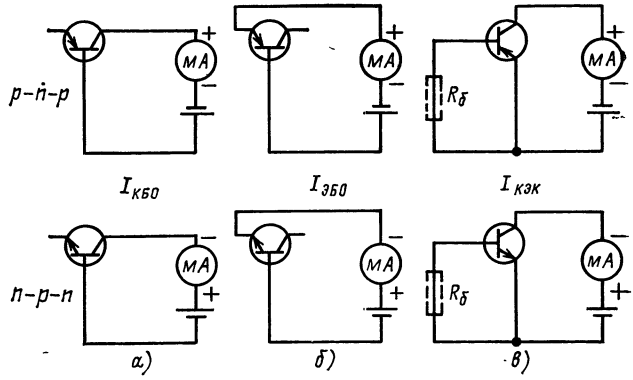
8.51. См. рисунок.

8.54. а) $I_Э=1{,}005$ мА; б) $I_Б=5$ мкА; в) $\alpha=0{,}99$; г) $I_{КЭ0}=0{,}505$ мА.

8.68. $C=-h_{22}/h_{21}$; $D=1/h_{21}$.

Указание. Воспользоваться соотношениями $I_К=h_{21}I_Э+h_{22}U_К$.

8.73. $h_{11}=47{,}7$ кОм; $h_{12}=71{,}2\cdot10^{-3}$; $h_{21}=1950$; $1/h_{22}=2{,}47$ МОм.



Ответ к задаче 8.51.

8.77. $r_э=25$ Ом; $r_б=500$ Ом; $r_к\approx1$ МОм; $\alpha=0{,}93$; $\beta=13{,}3$

8.78. $z_{11б}=530$ Ом; $z_{12б}=500$ Ом; $z_{21б}=237$ кОм; $z_{22б}=250$ кОм.

8.79. а) $h_{11к}=1{,}25$ кОм; $h_{12к}\approx1$; $h_{21к}\approx-25$; $h_{22к}=12{,}5$ мкСм; $z_{11к}=2$ МОм; $z_{12к}=80$ кОм; $z_{21к}=2$ МОм; $z_{22к}=80$ кОм; $Y_{11к}=800$ мкСм; $Y_{12к}=-800$ мкСм; $Y_{21к}=-20\,000$ мкСм; $Y_{22к}=20012{,}5$ мкСм; б) $h_{11э}=1{,}25$ кОм; $h_{12э}=0{,}15\cdot10^{-4}$; $h_{21э}=24$; $h_{22э}=12{,}5$ мкСм; $z_{11э}=2{,}22$ кОм; $z_{12э}=1{,}2$ Ом; $z_{21э}=-1{,}92$ МОм; $z_{22э}=80$ кОм; $Y_{11э}=800$ мкСм; $Y_{12э}=-0{,}012$ мкСм; $Y_{21э}=19\,200$ мкСм; $Y_{22э}=12{,}2$ мкСм.

8.80. а) $r_э=20$ Ом; $r_б=500$ Ом; $r_к=100$ кОм; $\alpha=0{,}8$; б) $Y_{11б}\approx3333$ мкСм; $Y_{12б}=-16{,}7$ мкСм; $Y_{21б}=-2660$ мкСм; $Y_{22б}=23{,}3$ мкСм.

8.81. $r_к=1{,}25$ МОм; $\alpha\approx0{,}99$.

8.82. $Y_{11б}=16\,700$ мкСм; $Y_{12б}=-8{,}35$ мкСм; $Y_{21б}=-16\,000$ мкСм; $Y_{22б}=9$ мкСм.

8.83. $h_{11э}=455$ Ом; $h_{21э}=2{,}04\cdot10^{-4}$; $h_{21э}=12{,}3$; $h_{22э}=13{,}3\cdot10^{-6}$ См.

8.84. $h_{11э}=3{,}89$ кОм; $h_{22э}=111$ мкСм; $h_{12э}=36{,}4\cdot10^{-4}$; $h_{21б}=-0{,}99$.

8.85. $\alpha=0{,}984$; $r_э=15$ Ом; $r_б=625$ Ом; $r_к=1{,}25$ МОм; $r_{кэ}=25$ кОм; $\mu_{эк}=4\cdot10^{-4}$.

8.87. $Y_{11б}=16\,700$ мкСм; $Y_{12б}=-8{,}33$ мкСм; $Y_{21б}=-15\,500$ мкСм; $Y_{22б}=+6{,}75$ мкСм; $Y_{11э}=1184{,}9$ мкСм; $Y_{12э}=-15{,}08$ мкСм; $Y_{21э}=155\,506$ мкСм; $Y_{22э}=+8{,}75$ мкСм; $Y_{11к}=1{,}2$ мСм; $Y_{12к}=-1{,}2$ мСм; $Y_{21к}=-16\,690$ мкСм; $Y_{22к}=16\,700$ мкСм.

8.88. $Y_{11э}=1200{,}3$ мкСм; $Y_{12э}=-0{,}3$ мкСм; $Y_{21э}=44\,288$ мкСм; $Y_{22э}=11{,}6$ мкСм.

8.89. $r_б=50$ Ом; $r_э=18{,}28$ Ом; $r_к=250$ кОм.

8.90. $h_{11э}=875$ Ом; $h_{12э}=3{,}75\cdot10^{-4}$; $h_{21э}=24$; $h_{22э}=25\cdot10^{-6}$ См.

8.91. $h_{11к}=2{,}25$ кОм; $h_{12к}\approx1$; $h_{21к}\approx50$; $h_{22к}=27{,}8\cdot10^{-6}$ См.

8.92. $r_э=40$ Ом; $r_б=500$ Ом; $r_к=1$ МОм; $r_г=960\,500$ Ом, $\alpha=0{,}96$.

8.93. $h_{11э}=200$ Ом; $h_{12э}=4\cdot10^{-3}$.

8.97. $h_{11б}=15$ Ом; $h_{12б}=1{,}4\cdot10^{-3}$.
8.105. $h_{11б}=39$ Ом; $h_{12б}=5{,}9\cdot10^{-4}$; $h_{21б}=-0{,}98$; $h_{22б}=4{,}9\cdot10^{-7}$ См.
8.106. $h_{11б}=34$ Ом; $h_{12б}=2{,}5\cdot10^{-4}$; $h_{21б}=-0{,}925$; $h_{22б}=10^{-6}$ См.
8.107. $\alpha=0{,}98$; $\beta=49$; $\gamma=50$.
8.114. 254 Ом.
8.116. $I_К\approx1{,}98$ мА; $U_{КБ}\approx5{,}1$ В.
8.118. $I_К\approx2$ мА; $U_{КБ}\approx-9$ В.
8.119. —3,3 В.
8.123. 0 и 2 В.
8.126. 50
8.129. а) —12 В; б) —24 В.
8.130. Примерно 10 В.
8.131. Примерно 0 (транзистор работает в режиме насыщения).
8.132. 1 мА.
8.133. —8 В.
8.138. $U_{вых}=1{,}38$ В; $R_{вых}=16{,}2$ кОм параллельно с $R_н=5$ кОм.
8.139. 2,1 мВт.
8.140. 216.
8.142. $K_I=-31$; $K_U=0{,}585$; $K_P=18{,}3$; $R_{вх}=53$ кОм; $R_{вых}=1$ кОм.
8.143. $R_{вх}=1{,}54$ кОм; $R_{вых}=32$ кОм; $K_I=27{,}3$; $K_U=-538$; $K_P=14\,600$.
8.144. $R_{вх}=1{,}84$ кОм; $R_{вых}\approx21$ кОм; $K_I=90$; $K_U=-49$; $K_P=4400$.
8.146. $R_{вх}=30{,}4$ Ом; $R_{вых}=214$ кОм; $K_I=-0{,}982$; $K_U=323$; $K_P=318$.
8.147. $R_{вх}=4{,}1$ кОм; $K_U=-121$.
8.148. $K_I=-0{,}97$; $K_U=32{,}3$; $K_P=31{,}3$; $R_{вх}=60$ Ом; $R_{вых}=533$ кОм.
8.149. $K_I=-33{,}4$; $K_U=1$; $K_P=33{,}4$; $R_{вх}=66{,}7$ кОм; $R_{вых}=75$ Ом.
8.150. $K_I=32{,}3$; $K_U=-32{,}3$; $K_P=1040$; $R_{вх}=2$ кОм; $R_{вых}=34{,}1$ кОм.
8.153. а) 10 мА; б) 6,67 В.
8.154. $I_{К0}=3{,}8$ мА; $U_{КБ0}=4{,}2$ В; $U_{КБ\,min}=0{,}6$ В; $U_{КБ\,max}=8{,}2$ В; $U_{ЭБ\,min}=0{,}570$ В; $U_{ЭБ\,max}=0{,}610$ В; $U_{ЭБ0}=0{,}590$ В, $I_{Э\,min}=1$ мА; $I_{Э\,max}=5$ мА. $I_{К\,max}=4{,}7$ мА; $I_{К\,min}=0{,}9$ мА.
8.155. $I_{mК}=2{,}3$ мА; $U_{m\,КЭ}\approx2{,}4$ В; $U_{m\,БЭ}=25$ мВ.
8.156. $R_н=1{,}1$ кОм; $U_{R0}=8{,}5$ В.
8.159. $I_{К0}=9{,}2$ мА; $U_{КБ0}=10$ В; $I_{mК}=4{,}9$ мА; $U_{mR}=4{,}9$ В; $P_{вых}=12$ мВт; $P_0=184$ мВт; $\eta=6{,}5\%$; $P_{К0}=99{,}4$ мВт; $K_I=0{,}98$.
8.160. $I_К=8$ мА; а) $I_{mК}=3{,}9$ мА; $U_{m\,КЭ}=3{,}9$ В; б) $K_I=13$ $P_{вых}=7{,}62$ мВт; $P_{К0}=120$ мВт <150 мВт (режим работы допустим); $P_0=184$ мВт; $\eta=4{,}14\%$; $U_{БЭ0}=0{,}84$ В; $U_{m\,БЭ}=0{,}11$ В; $P_{вх}=16{,}6$ мкВт; $K_U=-35{,}4$; $K_P=1572$.
8.161. а) $I_{mб}=200$ мкА; б) $I_{mК}=4{,}2$ мА; $U_{mR}=4{,}2$ В; $P_{вых}=8{,}8$ мВт; $P_{К0}=100$ мВт; г) $R_{вх}=150$ Ом.

8.163. $E_К = -23$ В; $I_{К0} = 8$ мА; $I_{mК} = 3,9$ мА; $U_{m\,КЭ} = 3,9$ В; $U_{БЭ0} = 0,84$ В; $U_{m\,БЭ} = 0,11$ В; $P_{вых} = 7,62$ мВт; $P_{вх} = 16,5$ мкВт; $P_{К0} = 120$ мВт $< P_{К\,max} = 150$ мВт; $P_0 = 184$ мВт. $\eta = 4,14\%$; $K_I = 13$; $K_U = -35,4$; $K_P = 460$.

8.164. б) $R_н = 8,7$ кОм; в) $U_{mБ} = 20$ мВ; г) $I_{mК} = 2,4$ мА; д) $U_{mR} = 2,1$ В; $I_{mБ} = 160$ мкА; е) $K_I = 15$; $U_U = 105$; $K_P = 1575$.

8.165. При $T = 20$ °С $I_К = 4,4$ мА; при $T = 40$ °С $I_К = 5,92$ мА; при $T = 60$ °С $I_К = 11,92$ мА.

8.167. 55 °С.

8.168. 47,5 °С.

8.169. 83 мВт; 166 мВт.

8.180. а) $3,1 \cdot 10^{-8}$ с; б) $6,38 \cdot 10^{-8}$ с; в) 32,4 МГц; 15,7 МГц.

8.181. Для транзистора типа *n-p-n* $\tau = 8,67 \cdot 10^{-8}$ с; $f = 11,5$ МГц; для транзистора типа *p-n-p* $\tau = 24 \cdot 10^{-8}$ с; $f = 4,16$ МГц.

8.182. 137 кВ/м; 0,2 нс.

8.183. 239 кВ/м; примерно 1,5 нс.

8.185. В 105 раз.

8.186. 58,6 пФ.

8.188. $r_э = 13$ Ом; $\tau = 0,4 \cdot 10^{-9}$ с; $f_{h_{21б}} = 398$ МГц; $C_э = 31,7$ пФ.

8.189. 20,4 мкм.

8.190. $f_{h_{21б}} = 36$ МГц $f_{h_{21э}} = 5,15$ МГц;

8.193. $|h_{21э}| = 35,4$; $\varphi = -45°$.

8.194. 180 МГц; 21,2.

8.195. $|h_{21б}| = 0,31$; $\varphi = -71°31'$.

8.196. 163 МГц.

8.197. 45,6.

8.200. $f_{h_{21э}} = 1$ МГц; $f_{гр} = 100$ МГц; $f_{h_{21б}} = 101$ МГц; $C_э = 308$ пФ; $r_{б'э} = 515$ Ом; $r_{бб'} = 85$ Ом.

8.201. а) 77.6; б) 618 пФ; в) 1028 пФ; г) 1 кОм.

8.202. $C_к = 2,78$ пФ; $g_{кэ} = 75$ мкСм.

8.203. $h_{11э} = 1,68$ кОм; $h_{12э} = 8,1 \cdot 10^{-4}$; $h_{21э} = 64,6$; $h_{22э} = 66$ мкСм.

8.204. $Y_{11э} = 595$ мкСм; $Y_{12э} = 0,5$ мкСм; $Y_{21э} = 38,4$ мА/В; $Y_{22э} = 0,34$ мкСм.

8.212. *А* — затвор; канал *p*-типа.

8.215. 8,5 В; 0,87 мкм.

8.216. 0,32 мА/В.

8.219. а) 0; 0; б) 2 мА; 0,8 мА/В; в) 0,5 мА; 0,4 мА/В.

Глава девятая

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРИБОРЫ

9.1. $R_1 = 50$ кОм, $P = 0,25$ Вт (переменный); $R_2 = 150$ кОм, $P = 1$ Вт (постоянный); $R_3 = 750$ кОм; $P = 5$ Вт (постоянный); $E_а = 2,1$ кВ.

9.4. 0,42 см; 6,67 см.

9.5. 70,7 В.

9.6. 0,707 мм/В.

9.7. 62,5 В.

9.8. 2,83 см.

9.9. 2,6 В.

9.10. Чувствительность пластин вертикального отклонения 1 и 0,67 мм/В; горизонтального отклонения 1,06 и 0,7 мм/В.

9.11. 2890 В.

9.12. 26 мм.

9.13. $x=8{,}53$ мм; $y=22$ мм.

9,15. а) $22{,}9\cdot10^6$ м/с; б) $7{,}86\cdot10^{-10}$ с.
в) $1{,}04\cdot10^6$ м/с; г) 147 В.

9.16. 0,2 мм/В.

9.17. 335 МГц.

9.18. При $\omega\tau=\pi/2\, f_{\text{пред}}=335$ МГц $h'=0{,}18$ мм/В; при $\omega\tau=\pi f_{\text{пред}}=670$ МГц $h'=0{,}13$ мм/В; при $\omega\tau=5\pi f_{\text{пред}}=3350$ МГц $h'=0{,}026$ мм/В.

9.19. 469 МГц; $5{,}3\cdot10^{-8}$.

9.20. Примерно 4,12 мм.

9.21. а) 11,25 см; б) примерно 11, 25 см; в) 7,98 см.

9.22. Примерно 3,1 мм и примерно 5,1 мм.

9.25. 467 ампер-витков; $7{,}76\cdot10^3$ витков.

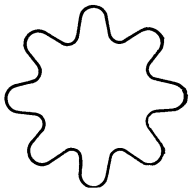
9.26. Уменьшить в 1,15 раза.

9.27. $2{,}47\cdot10^{-3}$ Тл.

9.29. 0,078 мм/А.

9.30. 0,68 мм/А.

9.33. 0,342 мм/А.



Ответ к задаче 9.51.

9.34. На 0,304 мм/А; б) на 0,38 мм/А.

9.35. 52 мА.

9.36. а) 33,7 мм; б) $B=1{,}33\cdot10^{-3}$ Тл; в) 37,5 мм; $B=1{,}4\cdot10^{-3}$ Тл.

9.37. 1 В/м.

9.40. 125 Гц.

9.47. Указание. Определение соотношения частот можно выполнить следующим способом. От какой-либо крайней точки, взятой на фигуре, начинаем описывать всю фигуру. При этом считаем изменение направления движения по вертикали, а затем по горизонтали. Отношение этих чисел определит отношение частот. В данном случае $f_y : f_x=5:2$.

9.48. $f_x : f_y=4:3$.

9.51. См. рисунок.

9.55. До 151 В.

9.56. 348 В.

Глава десятая

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

10.1. 0,2748 мкм.
10.2. а) Примерно 0,492 мкм и 0,685 мкм; б) 0,1905 мкм.
10.3. 100 мкА/лм.
10.4. 9,55 В.
10.5. 100 мкА/лм.
10.11. а) 0,1 лм; б) примерно 6,7 МОм.
10.13. 9,025.
10.14. а) 30 мкА/лм; 40 мкА/лм; б) 175 мкА/лм; 233 мкА/лм.
10.16. Примерно 71,2 В.
10.17. 7.
10.18. Примерно 6.
10.19. 4096.
10.20. Примерно 3.
10.21. а) $I_ф=5{,}6$ мкА; б) $I_а=110$ мА.
10.22. 3,98 мА/(лм·В).
10.23. а) $2{,}55\cdot10^{-2}$ лм; б) 62,5 мВт; в) 4,44 кОм.
10.28. 60 кОм.
10.29. а) 740 Ом; б) 80 мВ.
10.31. $I_{т0}=3{,}9\cdot10^{-4}$ А; $I_{обр}=80I_{т0}$; $U_0=0{,}11$ В.

Глава одиннадцатая

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

11.1. а) $1{,}91\cdot10^6$ м/с; б) 74%.
11.3. а) $2{,}75\cdot10^6$ м/с; б) 2,15 мм.
11.4. а) 6,87 мкм; б) атом вернется в нормальное состояние.
11.5. 7,3 мм.
11.6. а) 66,5 мм; б) 0,377 м.
11.7. $2{,}72\cdot10^4$ В/м.
11.9. $\gamma=1/(e^{\alpha d}-1)=0{,}053$.
11.16. 200 мА.
11.17. Указание. При решении задачи воспользоваться формулой $E_а=U_{ст}+R_{огр}(I_н+I_{ст})$. Для второго и третьего случаев эту формулу следует видоизменить. Если, например, напряжение источника может только уменьшаться, то формула имеет вид: $E_а=U_{ст}+R_{огр}(I_н+I_{ст\ min})$. а) 2 кОм; б) 3,75 кОм; в) 1,36 кОм.
11.18. 3,3 кОм; $I_{ст\ max}=20$ мА; $I_{ст\ min}=11$ мА.
11.19. 2,24 кОм. Стабилизация будет обеспечена на всем диапазоне изменений тока нагрузки.
11.20. 3,64 кОм; $E_{а\ max}=295$ В; $E_{а\ min}=205$ В.
11.22. 4,1 кОм.
11.23. 16,5 мА.

11.24. $R_{огр}$=2 кОм; $R_{доб}$=0,2 кОм.
11.25. 157,5 В; 5,7 кОм; 0,018 мкФ.
11.28. 6,25 В/мкА на пологом участке; 60 В/мкА на крутом участке; 4,5 мкА.
11.29. $R_н$=4 кОм; $R_{огр}$=6 МОм; 30 В.
11.32. 7 В; 440 Гц.
11.33. а) —32,5 В; б) 5,5 В; в) вправо.
11.36. 550 Ом.
11.38. 30°.
11.39. 1,43 А.
11.40. 66°.
11.43. —6 В.
11.44. $f=1/T=(E_а-U_{в.р})/[R_нC(E_а-U_п)]$=1000 Гц.
11.45. $8{,}33\cdot10^{-3}$ с.
11.46. 2 кГц.
11.47. $U_{а.в.р}$=75 В. Сеточный ток будет уменьшаться, пройдет через нулевое значение и начнет возрастать, анодный ток не изменится.
11.48. Примерно 2 кОм.
11.50. $\Delta U_с$=3 В.

Глава двенадцатая

ШУМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

12.5. $1{,}285\cdot10^{-8}$ В.
12.6. $5{,}66\cdot10^{-9}$ А.
12.7. $U_ш$=0,19 мкВ; $R_ш$=500 Ом.
12.8. 0,026.
12.9. У пентода 6Ж5П $R_ш$=835 Ом; у пентода 6Ж45Б-В $R_ш$=1,2 кОм.
12.10. У триода $R_ш$=556 Ом; у пентода $R_ш$=1,89 кОм.
12.11. 0,14 Ом.
12.12. $1{,}8\cdot10^{-4}$ В.
12.13. $\overline{u}^2_{Дж}+\overline{u}^2_{Др}=(6\cdot3\cdot10^{-12}+1{,}16\cdot10^{-13})$ В^2.
12.14. $5{,}15\cdot10^{-12}$ Вт·Гц$^{-1/2}$.
12.18. $\overline{i^2}_{изб}=4{,}6kI^2$, если в формуле $\overline{i^2}_{изб}=k\,(I^\alpha/f^\beta)\,\Delta f$ положить $\alpha\approx2$ и $\beta=1$.
12.20. а) 1,75; б) 750 Ом.
12.21. 0,8 мкВ.
12.22. 210 Ом; 4 мСм; 5,34.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Некоторые физические постоянные

Постоянная Планка $h=6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж·с$=4{,}14\cdot10^{-15}$ эВ·с.

Постоянная Больцмана $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К$=8{,}62\cdot10^{-4}$ эВ/К.

Масса электрона $m=9{,}106\cdot10^{-31}$ кг.

Заряд электрона $e=1{,}602\cdot10^{-19}$ Кл.

Диаметр электрона $D=5{,}63\cdot10^{-15}$ м.

Диэлектрическая проницаемость свободного пространства $\varepsilon_0=8{,}86\cdot10^{-12}$ Ф/м.

Магнитная проницаемость свободного пространства $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м$=1{,}257\cdot10^{-6}$ Гн/м.

Масса протона $M_p=1{,}67\cdot10^{-27}$ кг.

Отношение массы протона к массе электрона $M_p/m=1{,}837\cdot10^3$.

Скорость света $c=2{,}99778\cdot10^8$ м/с. 1 эВ$=1{,}602\cdot10^{-19}$ Дж; 1 Ом×см$=10^4$ Ом·мм²/м.

Зависимость $\beta^2=f(r_а/r_к)$ (рис. П.1)

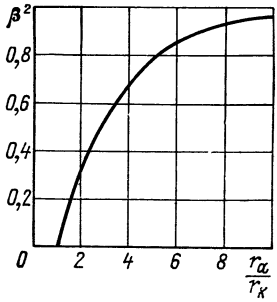


Рис. П.1.

Приложение 2

Постоянные термоэлектронной эмиссии

Материал катода	A, А/см² град²	$b_0=e\varphi_0/k$, К	$e\varphi_0$, эВ
Вольфрам	60	52 400	4,52
Торий на вольфраме (100%-ное покрытие)	3,0	30 500	2,63
Торий на карбиде вольфрама	$1{,}15\ 10^{-2}$	17 400	1,49
Окись бария на вольфраме	0,01	11 200	1,0

Приложение 3

Параметры германия и кремния

Параметр	Ge	Si
Плотность, г/см^3	5,32	2,33
Атомная масса	72,60	28,1
Плотность атомов, см$^{-3}$	$4{,}4\cdot10^{22}$	$5{,}0\cdot10^{22}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	16	12
Ширина запрещенной зоны, эВ:		
при $T=0$ К	0,785	1,21
при $T=300$ К	0,72	1,12
Эффективная масса (m^*/m_0):		
электронов	0,12	0,26
дырок	0,28	0,49
Подвижность электронов, см^2/(В·с)	3900	1400
Подвижность дырок, см^2/(В·с)	1900	500
Собственная концентрация носителей при 0 °С, см$^{-3}$	$2{,}5\cdot10^{13}$	10^{10}
Собственное удельное сопротивление, Ом·см ($T=293$ К)	68	$2\cdot10^5$
Коэффициент диффузии электронов, см^2/с	99	34
Коэффициент диффузии дырок, см^2/с	47	13

Приложение 4

Пересчет параметров четырехполюсника

	z		Y		h		a	
z	z_{11}	z_{12}	$\frac{Y_{22}}{\Delta Y}$	$\frac{-Y_{12}}{\Delta Y}$	$\frac{\Delta h}{h_{22}}$	$\frac{h_{12}}{h_{22}}$	$\frac{a_{11}}{a_{21}}$	$\frac{\Delta a}{a_{21}}$
	z_{21}	z_{22}	$\frac{-Y_{21}}{\Delta Y}$	$\frac{Y_{11}}{\Delta Y}$	$\frac{-h_{21}}{h_{22}}$	$\frac{1}{h_{22}}$	$\frac{1}{a_{21}}$	$\frac{a_{22}}{a_{21}}$
Y	$\frac{z_{22}}{\Delta z}$	$\frac{-z_{12}}{\Delta z}$	Y_{11}	Y_{12}	$\frac{1}{h_{11}}$	$\frac{-h_{12}}{h_{11}}$	$\frac{a_{22}}{a_{12}}$	$\frac{-\Delta a}{a_{12}}$
	$\frac{-z_{21}}{\Delta z}$	$\frac{z_{11}}{\Delta z}$	Y_{21}	Y_{22}	$\frac{h_{21}}{h_{11}}$	$\frac{\Delta h}{h_{11}}$	$\frac{-1}{a_{12}}$	$\frac{a_{11}}{a_{12}}$
h	$\frac{\Delta z}{z_{22}}$	$\frac{z_{12}}{z_{22}}$	$\frac{1}{Y_{11}}$	$\frac{-Y_{12}}{Y_{11}}$	h_{11}	h_{12}	$\frac{a_{12}}{a_{22}}$	$\frac{\Delta a}{a_{22}}$
	$\frac{-z_{21}}{z_{22}}$	$\frac{1}{z_{22}}$	$\frac{Y_{21}}{Y_{11}}$	$\frac{\Delta Y}{Y_{11}}$	h_{21}	h_{22}	$\frac{-1}{a_{22}}$	$\frac{a_{21}}{a_{22}}$
a	$\frac{z_{11}}{z_{21}}$	$\frac{\Delta z}{z_{21}}$	$\frac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	$\frac{-1}{Y_{21}}$	$\frac{-\Delta h}{h_{21}}$	$\frac{-h_{11}}{h_{21}}$	a_{11}	a_{12}
	$\frac{1}{z_{21}}$	$\frac{z_{22}}{z_{21}}$	$\frac{-\Delta Y}{Y_{21}}$	$\frac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	$\frac{-h_{22}}{h_{21}}$	$\frac{-1}{h_{21}}$	a_{21}	a_{22}

$\Delta z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$; $\Delta Y = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}$; $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$; $\Delta a = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$.

Приложение 5

Связь между h-параметрами транзисторов в различных схемах включения

$$h_{11э} = \frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}}; \quad h_{11к} = h_{11э}; \quad h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}};$$

$$h_{12э} = \frac{h_{11б}h_{22б}}{1 + h_{21б}} - h_{12б}; \quad h_{12к} = 1; \quad h_{12б} = \frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э};$$

$$h_{21э} = -\frac{h_{21б}}{1 + h_{21б}}; \quad h_{21к} = h_{21э} + 1; \quad h_{21б} = -\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}};$$

$$h_{22э} = \frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}}; \quad h_{22к} = h_{22э}; \quad h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}}.$$

Приложение 6

Связь между Y-параметрами при различных включениях электронных приборов:

$$Y_{111} = Y_{112} + Y_{122} + Y_{212} + Y_{222} = Y_{223};$$
$$Y_{121} = -Y_{122} - Y_{222} = -Y_{213} - Y_{223};$$
$$Y_{211} = -Y_{212} - Y_{222} = -Y_{123} - Y_{223};$$
$$Y_{221} = Y_{222} = Y_{113} + Y_{123} + Y_{213} + Y_{223};$$

$$Y_{112} = Y_{111} + Y_{121} + Y_{211} + Y_{221} = Y_{113};$$
$$Y_{122} = Y_{121} + Y_{221} = -Y_{113} - Y_{123};$$
$$Y_{212} = -Y_{211} - Y_{221} = -Y_{113} - Y_{213};$$
$$Y_{222} = Y_{221} = Y_{113} + Y_{123} + Y_{213} + Y_{223};$$

$$Y_{113} = Y_{111} + Y_{121} + Y_{211} + Y_{221} = Y_{112};$$
$$Y_{123} = -Y_{111} - Y_{211} = -Y_{112} - Y_{122};$$
$$Y_{213} = -Y_{111} - Y_{121} = -Y_{112} - Y_{212};$$
$$Y_{223} = Y_{111} = Y_{112} + Y_{222} + Y_{122} + Y_{212}.$$

Примечание. Третий индекс в обозначении параметра указывает схему включения усилительного прибора:

1 — схема с общей базой или общей сеткой; 2 — схема с общим эмиттером или общим катодом; 3 — схема с общим коллектором или общим катодом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Батушев В. А.** Электронные приборы. — 2-е изд., перераб. и доп., — М.: Высшая школа, 1980. — 383 с.

2. **Дулин В. Н.** Электронные приборы. — М.: Энергия, 1977.—422 с.

3. **Морозова И. Г.** Физика электронных приборов. — М.: Атомиздат, 1980. — 392 с.

4. **Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д.** Полупроводниковые приборы. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1981—431 с.

5. **Степаненко И. П.** Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977. — 608 с.

6. **Трутко А. Ф.** Методы расчета транзисторов. — М.: Энергия, 1971. — 271 с.

7. **Агаханян Т. М.** Основы транзисторной электроники.— М.: Энергия, 1974. — 256 с.

8. **Спиридонов Н. С.** Основы теории транзисторов.— Киев: Техніка, 1976. — 300 с.

9. **Жеребцов И. П.** Основы электроники. — Л.: Энергия, 1974. — 416 с.

10. **Зи С. М.** Физика полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973. — 367 с.

11. **Пауль П.** Транзисторы. Физические основы и свойства: Пер. с нем./ Под ред. И. Н. Палехова. — М.: Советское радио, 1973. — 504 с.

12. **Кобболд Р.** Теория и применение полевых транзисторов: Пер. с англ. — Л.: Энергия, 1975. — 304 с.

13. **Федотов Я. А.** Основы физики полупроводниковых приборов.— М.: Советское радио, 1969. — 592 с.

14. **Шалимова К. В.** Физика полупроводников. — М.: Энергия, 1976. — 416 с.

15. **Хлебников Н. Н.** Электронные приборы. — М.: Связь, 1966.

16. **Полупроводниковые** приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник/ А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н. Н.Горюнова. — М.: Энергоиздат, 1982. —744 с.

17. **Транзисторы/** Под ред. И. Г. Бергельсона, Ю. А. Каменецкого, И. Ф. Николаевского. — М.: Советское радио, 1968. — 503 с.

18. **Николаевский И. Ф., Игумнов Д. В.** Параметры и предельные режимы работы транзисторов. — М.: Советское радио, 1971. — 381 с.

19. **Образский Г. С., Павлик Е. И.** Сборник задач, вопросов и упражнений по курсу «Электронные приборы». — Л.: ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1974. — 187 с.

20. **Терехов В. А., Щербаков О. В.** Полупроводниковые приборы.— Л.: ВВМУРЭ им. А. С. Попова, 1976. — 317 с.

21. **Кацман Ю. А.** Электронные лампы. — М.: Высшая школа, 1979. — 303 с.

22. **Клейнер Э. Ю.** Основы теории электронных ламп. — М.: Высшая школа, 1974. — 367 с.

23. **Линч П., Николайдес А.** Задачи по физической электронике.— М.: Мир, 1975. — 264 с.

24. **Жигарев А. А.** Электронная оптика и электронно-лучевые приборы. — М.: Высшая школа, 1972. — 539 с

25. **Шерстнев Л. Г.** Электронно-лучевые приборы и электронная оптика. — М.: Энергия, 1971. — 367 с.

26. **Царев Б. М.** Расчет и конструирование электронных ламп.— М : Энергия, 1967. — 671 с.

27. **Виноградов Ю. В.** Основы электронной и полупроводниковой техники. — М.: Энергия, 1973. — 535 с.

28. **Основы** применения электронных приборов/ Ю. Д Рагозин, В. П. Аксенов, В. И. Марин, О. В. Аристов — М.: Высшая щкола, 1975 — 367 с.

29. **Каганов И. Л.** Ионные приборы — М : Энергия, 1972. — 525 с.

30. **Соболева Н. А., Меламед А. Е.** Фотоэлектронные приборы. — М : Высшая школа, 1974. — 375 с.

31. **Терехов В. А.** Задачник по электровакуумным и полупроводниковым приборам — Л.: Энергия, 1971. — 128 с.

32 **Денискин Ю. Д., Жигарев А. А., Смирнов Л. Г.** Электронные приборы (программированное учебное пособие)/ Под ред. Р. А. Нилендера — М.: Энергия, 1980. — 280 с.

33. **Кацнельсон Б. В., Калугин А. М., Ларионов А. С.** Электровакуумные, электронные и ионные приборы/ Под ред. А С. Ларионова. — М · Энергия, 1976. — 920 с

34. **Полупроводниковые** приборы: Транзисторы. Справочник / В. А. Аронов, А. В. Баюков, А. А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н Н. Горюнова. — М.: Энергоиздат, 1982. — 904 с.

35. **Справочник** радиолюбителя-конструктора. 3-е изд., перераб. и доп. — М : Радио и связь, 1982. — 478 с

36. **Гурлев Д. С.** Справочник по электронным приборам — Киев: Техніка, 1979. — 462 с

37. **Кацнельсон Б. В. Ларионов А. С.** Электровакуумные электронные и ионные приборы. Справочник — М : Энергия, 1974. — 464 с.

38. **Транзисторы.** Справочник/ Под ред И. Ф. Николаевского.—М.: Связь, 1970 — 623 с

39. **Степаненко И. П.** Основы микроэлектроники. — М : Советское радио, 1980 — 318 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ ТЕРЕХОВ

ЗАДАЧНИК ПО ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ

Редактор **Ю. Д. Денискин**
Редактор издательства **А. Н. Гусяцкая**
Технический редактор **О. Д. Кузнецова**
Корректор **И. А. Володяева**

ИБ № 1719

Сдано в набор 13.01.83 Подписано в печать 30.03.83 Т-08248
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 14,7 Усл. кр.-отт. 14,7 Уч.-изд. л. 15,43
Тираж 20 000 экз. Заказ 3049 Цена 75 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

Агаханян Т. М. Интегральные микросхемы. Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1983 (II кв.).29 л., ил. — В пер.: 1 р.: 30 к.

Рассмотрены особенности монолитных и гибридных интегральных микросхем (ИМС) и их элементов. Дано описание основных ячеек аналоговых ИМС. Подробно рассмотрены операционные усилители. Рассмотрены основные типы цифровых ИМС на биполярных и униполярных транзисторах и построенные на их основе триггерные системы. Дано описание интегральных компараторов напряжений. Приведены монолитные и гибридные релаксационные ИМС.

Для студентов вузов и аспирантов, специализирующихся по радиоэлектронике, автоматике, вычислительной технике.

75 коп.