

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

2.1. Основные понятия и определения

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя внешними выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего перехода. В качестве выпрямляющего электрического перехода в полупроводниковых диодах чаще всего используется электронно-дырочный переход (*p-n*-переход).

Образование *p-n*-перехода на границе *p*- и *n*-областей полупроводника происходит вследствие диффузии носителей заряда (электронов и дырок) из-за разницы в концентрации одного типа носителей по обе стороны этой границы. Например, концентрация электронов в *n*-области (n_{n0}), являющихся основными носителями заряда, намного превышает концентрацию электронов в *p*-области (n_{p0}), где они являются неосновными носителями. В результате носители вблизи границы начинают двигаться из области, где их много, в область, где их количество существенно меньше. Электроны двигаются из *n*-области в *p*-область, а дырки – в противоположном направлении. При этом, уходя из приграничной области, носители оставляют там нескомпенсированный заряд ионизированных примесей: в *n*-области – положительный заряд ионизированных доноров, в *p*-области – отрицательный заряд ионизированных акцепторов. Таким образом, на границе *p*- и *n*-областей возникает двойной заряженный слой (рис. 2.1, *a*), электрическое поле которого ($E_{\text{диф}}$) начинает препятствовать дальнейшей диффузии носителей заряда.

В состоянии равновесия сила,двигающая носители вследствие диффузии и определяемая разностью концентраций носителей одного знака, уравновешивается силой,двигающей носители полем двойного заряженного слоя и определяемой разностью потенциалов этого слоя. Таким образом, численное значение контактной разности потенциалов *p-n*-перехода ($\varphi_{\text{к}}$) определяется разностью концентраций носителей ($n_{n0} - n_{p0}$) и ($p_{p0} - p_{n0}$). Тогда увеличение концентрации примесей в прилегающих к *p-n*-переходу областях приведет к увеличению концентрации основных носителей заряда n_{n0} , p_{p0} , разности концентраций возрастут, и больше будет контактная разность потенциалов. При увеличении температуры концентрации основных

носителей заряда практически не изменяется, если примеси полностью ионизированы, но существенно возрастет концентрация неосновных носителей n_{p0} , p_{n0} за счет увеличения ионизации собственных атомов. Тогда разности концентраций уменьшаются и, следовательно, уменьшится Φ_K . В полупроводниках с большей шириной запрещенной зоны концентрации неосновных носителей меньше, так как больше энергии требуется на ионизацию собственных атомов, поэтому разность концентраций будет больше, а значит больше и Φ_K .

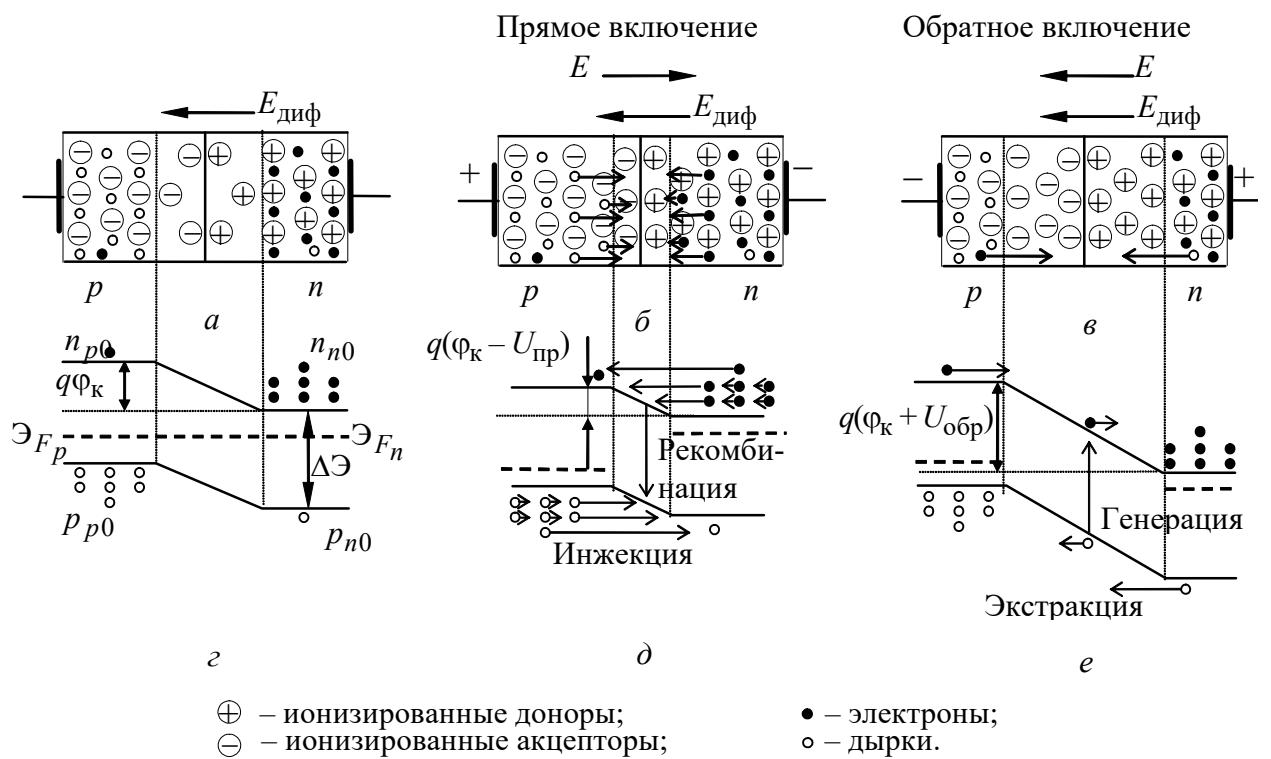


Рис. 2.1. *P-n*-переход: *а – в* – пространственное распределение зарядов; *г – е* – энергетические диаграммы

С энергетической точки зрения, наличие двойного заряженного слоя в *p-n*-переходе означает присутствие потенциального барьера для основных носителей на границе *p*- и *n*-областей (рис. 2.1, *г*). Высота этого барьера определяется контактной разностью потенциалов. Высоту потенциального барьера *p-n*-перехода можно изменить, прикладывая внешнее напряжение. Если направление внешнего поля противоположно направлению диффузионного поля *p-n*-перехода (прямое включение, рис. 2.1 *б*, *д*), то высота потенциального барьера понижается и становится возможной диффузия основных носителей через *p-n*-переход. Если направление внешнего поля совпадает с направлением диффузионного поля *p-n*-перехода (обратное включение, рис. 2.1, *в*, *е*), то потенциальный барьер возрастает, и переход основных носителей затрудняется. Правда, при этом возможно

движение через p - n -переход неосновных носителей заряда, для которых потенциального барьера не существует. Описанные процессы определяют вид вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода.

Основным процессом образования прямого тока через диод является инжекция носителей заряда, то есть их введение через p - n -переход при понижении высоты потенциального барьера. При увеличении прямого напряжения высота потенциального барьера уменьшается пропорционально приложенному напряжению. Носители заряда распределены по энергетическим уровням в соответствии со статистикой Максвелла–Больцмана по экспоненциальному закону, поэтому количество носителей, переходящих через p - n -переход, будет экспоненциально изменяться в соответствии с приложенным напряжением, т.е. прямой ток будет экспоненциально зависеть от напряжения.

Таким образом, прямой ток в диоде в основном определяется высотой потенциального барьера p - n -перехода, поэтому влияние различных факторов на значение прямого тока обусловлено влиянием этих факторов на высоту потенциального барьера. При увеличении температуры высота потенциального барьера p - n -перехода понижается, а значит, тот же прямой ток может быть получен при меньшем прямом напряжении на диоде. В диодах на основе полупроводников с большой шириной запрещенной зоны высота потенциального барьера p - n -перехода больше, а значит, тот же прямой ток достигается при большем прямом напряжении на диоде. Другой составляющей прямого тока может быть ток, связанный с рекомбинацией носителей заряда в области p - n -перехода (см. рис. 2.1, δ). Однако с увеличением прямого напряжения ширина p - n -перехода уменьшается, и уменьшается вклад этой составляющей в прямой ток.

Основным процессом образования обратного тока через диод, изготовленный из материала с небольшой шириной запрещенной зоны (например, германия), является экстракция носителей заряда, т.е. вытягивание неосновных носителей заряда из областей полупроводника, прилегающих

к

p - n -переходу. Поскольку обратное напряжение не влияет на интенсивность тепловой генерации неосновных носителей, обратный ток в этом случае не зависит от обратного напряжения.

Основным процессом образования обратного тока через диод, изготовленный из материала с большой шириной запрещенной зоны (например, кремния), является тепловая генерация носителей в p - n -переходе.

Возникшие при тепловой генерации пары "электрон–дырка" разделяются электрическим полем перехода, что приводит к появлению обратного тока (см. рис. 2.1, *e*). С увеличением обратного напряжения увеличивается ширина *p-n*-перехода, поэтому генерационная составляющая тока заметно увеличивается с ростом напряжения.

При увеличении температуры обратные токи диодов растут из-за увеличения тепловой генерации носителей заряда в *p-n*-переходе и генерации неосновных носителей заряда в прилегающих к нему областях полупроводника. В диодах на основе полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны интенсивность тепловой генерации носителей заряда выше, а следовательно обратный ток больше.

Работа выпрямительного диода основана на том, что его прямой ток значительно больше обратного. В конечном итоге это определяется тем, что прямой ток обусловлен переходом через потенциальный барьер основных носителей заряда, а обратный – движением неосновных носителей заряда, концентрация которых в полупроводнике значительно (в миллиарды раз) меньше, чем концентрация основных.

Ухудшение выпрямляющих свойств диода на высокой частоте связано с тем, что в этом случае происходит быстрое переключение *p-n*-перехода с прямого включения в обратное. При прямом включении через *p-n*-переход инжектируются неосновные носители заряда, которые при быстром изменении полярности напряжения могут обеспечить довольно большой обратный ток. Другой причиной ухудшения выпрямляющих свойств может быть барьерная емкость *p-n*-перехода. На высокой частоте барьерная емкость может шунтировать большое обратное сопротивление *p-n*-перехода, обеспечивая довольно большие обратные токи.

2.2. Описание установки

Исследование ВАХ диодов проводят методом харктериографа с помощью осциллографа С1-83 (рис. 2.2). Генератор *G* обеспечивает переменное напряжение одной полярности. Последовательно с диодом включен резистор *R*, напряжение с которого, пропорциональное току, проходящему через диод, подается на пластины вертикального отклонения осциллографа ("Y" – канал II). Напряжение с диода подается на пластины горизонтального отклонения осциллографа ("X" – канал I). При этом сопротивление резистора выбрано настолько малым, что падением напряжения на нем по сравнению с падением напряжения на диоде можно пренебречь.

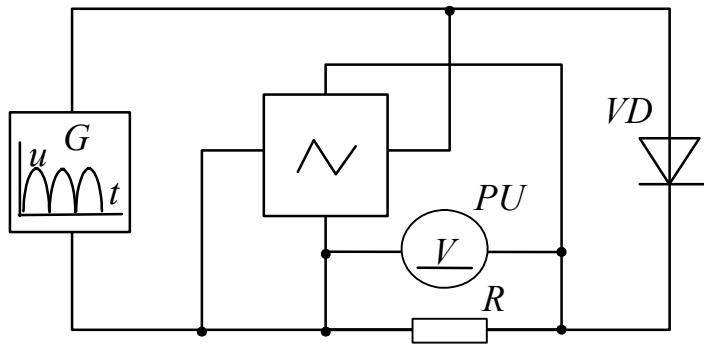


Рис. 2.2. Схема для исследования выпрямительных диодов

Кроме ВАХ на экране осциллографа в режиме временной развертки можно наблюдать зависимости от времени тока, проходящего через диод (канал II), и напряжения на диоде (канал I). В этом случае на схему подают переменное напряжение синусоидальной формы от внешнего генератора звуковых частот ГЗ-102, а резистор R выполняет функцию нагрузки. Выпрямленное напряжение на нагрузке измеряют вольтметром постоянного тока. Таким образом можно исследовать зависимость выпрямительных свойств диода от частоты.

Диоды, исследуемые в работе, помещены в термостат, обеспечивающий изменение температуры от комнатной до 70 °С. Температура контролируется стрелочным прибором, установленным на лицевой панели лабораторного стенда.

2.3. Проведение исследований

Целью работы является экспериментальное исследование ВАХ германиевого и кремниевого выпрямительных диодов, а также их выпрямительных свойств в зависимости от частоты переменного сигнала.

2.3.1. Исследование прямой ветви вольт-амперной характеристики

Установить на стенде переключатель рода работ в положение "прямое". Включить осциллограф С1-83 в режим характеристиографа, для чего установить переключатель рода работ и переключатель синхронизации в положение " $X-Y$ ". Установить переключатели чувствительности входов в положения: для канала I (" X ") – "20 мВ/дел" $\times 10$ и для канала II (" Y ") – "1 мВ/дел" $\times 10$. При закороченных входах осциллографа (положения переключателей входов – " \perp ") с помощью регуляторов " \leftrightarrow " и " \uparrow " (канал II) установить светящуюся точку на экране в начало координат (левый нижний угол экрана осциллографа).

В дальнейшем при изменении масштабов по осям координат каждый раз проверять положение начала координат.

Установить переключатели входов осциллографа в положение открытого входа (" \equiv ") и зарисовать прямые ветви ВАХ германиевого и кремниевого диодов. Отметить на осях координат единицы измерения и значения напряжения и тока, учитывая, что масштаб тока по вертикальной оси $m_{yi} = m_{yu}/R$, где m_{yu} – масштаб по напряжению канала II, а $R = 1$ Ом.

2.3.2. Исследование обратной ветви вольт-амперной характеристики

Установить переключатель рода работ в положение "обратное", переключатели чувствительности входов осциллографа в следующие положения: для канала I ("X") – "0,1 В/дел" $\times 10$ и для канала II ("Y") – "1 мВ/дел" $\times 10$. Зарисовать обратные ветви ВАХ германиевого и кремниевого диодов. Отметить на осях координат значения и единицы измерения тока и напряжения, учитывая, что для обратного включения $R = 5$ кОм.

2.3.3. Исследование частотных свойств выпрямительного диода

Установить переключатель рода работ в положение "Выпрямление". Включить генератор звуковых частот ГЗ-102. Перевести осциллограф в режим временной развертки, для чего переключатель синхронизации установить в положение "I", а переключатель рода работ – в положение " $\rightarrow\rightarrow$ ". При закороченных входах осциллографа регулировкой уровня синхронизации получить изображения прямых линий на экране и разместить их так, чтобы можно было наблюдать сигналы с обоих входов. Чувствительность входов при этом должна составлять: для канала I – "0,5 В/дел" $\times 10$ и для канала II – "0,2 В/дел" $\times 10$. Установить частоту переменного сигнала 300 Гц, а длительность развертки осциллографа 2 мс/дел. Регулировкой выходного напряжения генератора установить по осциллографу (канал I) амплитуду этого напряжения равной 5 В. В дальнейшем при изменении частоты поддерживать эту амплитуду постоянной. Измерить с помощью стрелочного прибора выпрямленное напряжение для разных частот. Результаты записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

f , кГц	0,03	0,1	0,3	1	3	10	30	100	200
U_B , В									

Зарисовать осцилограммы тока (канал II) для частот 0,3, 3,0 и 30 кГц, изменяя длительность развертки обратно пропорционально частоте сигнала (2; 0,2 и 0,02 мс/дел.) и подстраивая уровень синхронизации.

Выключить генератор звуковых частот.

2.3.4 Исследование вольт-амперной характеристики диодов при повышенной температуре

Включить нагрев термостата и после установления температуры записать ее значение. Перевести осциллограф в режим характеристографа (см. 2.3.1), установив следующую чувствительность входов: для канала I ("X") – "20 мВ/дел"×10 и для канала II ("Y") – "1 мВ/дел"×10. Зарисовать прямые ветви ВАХ германиевого и кремниевого диодов (переключатель рода работ установки – в положении "прямое").

То же самое выполнить для обратных ветвей ВАХ при чувствительности входов осциллографа: для канала I ("X") – "0,1 В/дел"×10 и для канала II ("Y") – "1 мВ/дел"×10 (для кремниевого диода) и "20 мВ/дел"×10 (для германиевого диода). Зарисовать обратные ветви ВАХ, отметив на осях координат единицы измерения и значения тока и напряжения в соответствии с выбранными масштабами и с учетом сопротивлений резистора (для прямого включения $R = 1 \text{ Ом}$, для обратного $R = 5 \text{ кОм}$).

2.4. Обработка результатов

1. Построить ВАХ германиевого и кремниевого диодов по экспериментальным осциллограммам.
2. По ВАХ рассчитать статическое сопротивление диодов в прямом и обратном направлениях для двух значений токов и напряжений (при прямом включении – для максимального тока и для половины максимального значения тока, при обратном включении – для максимального обратного напряжения и для половины максимального значения напряжения). Результаты представить в виде табл. 2.2.

Таблица 2.2

Германиевый диод				Кремниевый диод			
$T_1 =$		$T_2 =$		$T_1 =$		$T_2 =$	
$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$	$R_{\text{обр}}, \text{кОм}$						

3. По данным табл. 2.1 построить частотную зависимость выпрямленного напряжения в полулогарифмическом масштабе (по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе, ось ординат должна иметь линейный масштаб). По графику определить частоту, до которой выпрямительные свойства диода не изменяются.

4. По значениям обратного тока при двух температурах и при неизменных обратных напряжениях оценить ширину запрещенной зоны германия по формуле

$$\Delta\varTheta = k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} [\ln I_{\text{обр}}(T_1) - \ln I_{\text{обр}}(T_2)].$$

2.5. Контрольные вопросы

1. Почему сопротивление диода в прямом направлении включения значительно меньше, чем в обратном направлении?
2. Чем объяснить различия ВАХ германиевых и кремниевых диодов?
3. Чем определяется характер зависимостей тока от напряжения для диодов при прямом и обратном включениях?
4. Как объяснить температурные изменения ВАХ диодов?
5. Почему выпрямительные свойства диодов ухудшаются с увеличением частоты?

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

4.1. Основные понятия и определения

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, усиливательные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем.

Среди полевых транзисторов важное место занимают МДП-транзисторы с индуцированным каналом и полевые транзисторы с управляемым *p-n*-переходом. Структура МДП-транзистора с индуцированным *n*-каналом показана на рис. 4.1, *a*. В кристалле относительно высокоомного полупроводника (подложке) сформированы две сильнолегированные области с противоположным типом электропроводности, к которым изготавливаются металлические электроды – *исток* И и *сток* С. На поверхности кристалла между истоком и стоком методом термического окисления сформирован тонкий слой диэлектрика (SiO_2), на который нанесен металлический электрод – *затвор* З. Получается структура, состоящая из слоя металла, диэлектрика и полупроводника, т. е. МДП-структура.

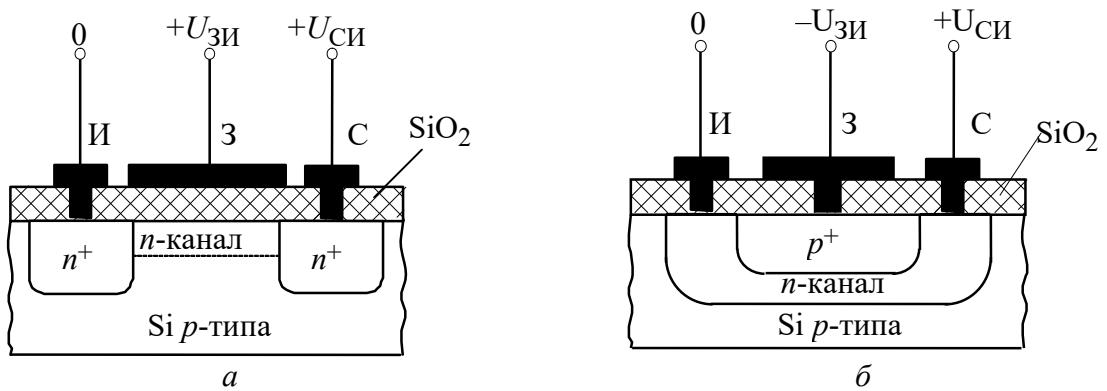


Рис. 4.1. Структура: *а* – МДП-транзистора с индуцированным каналом; *б* – полевого транзистора с управляемым *p-n*-переходом

В основе работы МДП-транзистора лежит эффект поля. При напряжении на затворе относительно истока, равном нулю, и при наличии напряжения на стоке ток стока оказывается ничтожно малым. Он представляет собой обратный ток *p-n*-перехода стока. При напряжениях на затворе, больших напряжения $U_{\text{ЗИ}}$ пор – порогового напряжения, – под действием электрического поля затвора у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсный слой (слой с электропроводностью, противоположной электропроводности подложки). Этот инверсный слой, соединяющий между собой две сильнолегированные области истока и стока, и является

проводящим каналом (рис 4.2). С увеличением напряжения на затворе повышается концентрация носителей заряда в канале, уменьшается его сопротивление и, как следствие,

растет ток стока. Так происходит управление током стока в МДП-транзисторе. Поскольку затвор отделен от подложки слоем диэлектрика, ток в цепи затвора мал (нерегулируемый ток утечки), мала и мощность,

потребляемая от источника питания в цепи затвора и необходимая для управления относительно большим током стока, т. е. МДП-транзистор может усиливать электрические сигналы по напряжению и по мощности.

Так как ток затвора из-за наличия диэлектрика практически отсутствует, для описания работы МДП-транзистора используется семейство вольт-амперных характеристик передачи (в биполярном транзисторе – входные ВАХ), а также семейство выходных ВАХ (рис. 4.3).

Статические вольт-амперные характеристики передачи МДП-транзистора – это зависимости тока стока I_C от напряжения на затворе относительно истока $U_{ЗИ}$: $I_C = f(U_{ЗИ})$ при различных фиксированных напряжениях на стоке $U_{СИ}$ (рис. 4.3, а). Характеристики для разных напряжений на стоке выходят из точки на оси абсцисс, соответствующей пороговому напряжению $U_{ЗИ, \text{пор}}$. С ростом напряжения на затворе растет концентрация носителей заряда в канале, следовательно, и ток стока. При большом напряжении на затворе $U_{ЗИ}$ заряд в канале экранирует влияние затвора на подложку, и ток стока I_C практически не увеличивается. Носители заряда в канале движутся под действием напряжения на стоке (дрейф под действием поля в канале), поэтому с

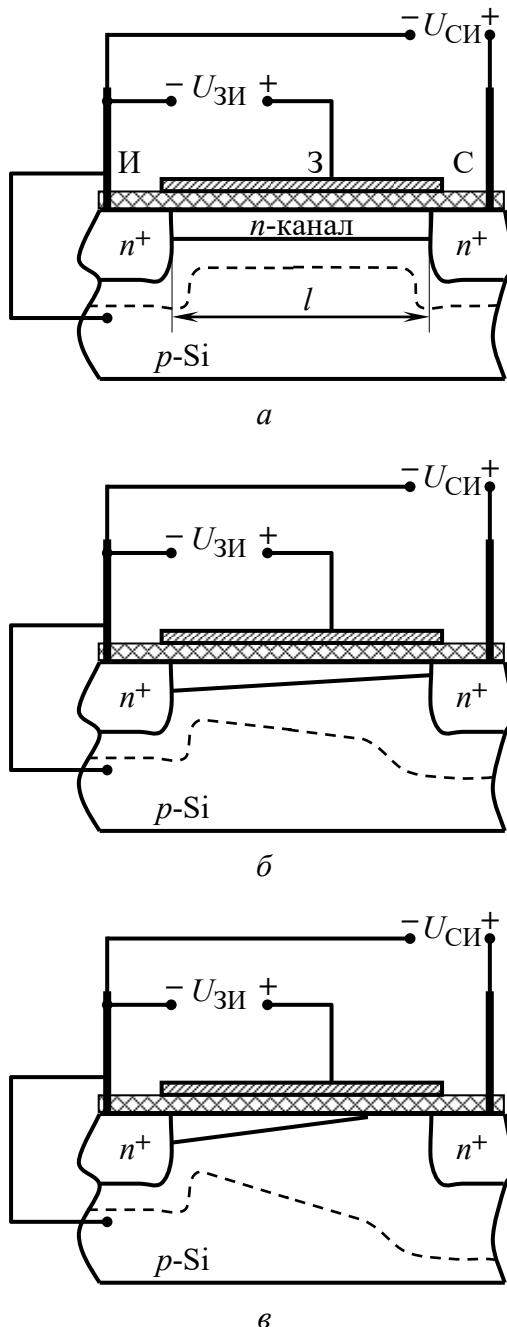


Рис. 4.2. Изменение формы канала (и области объемного заряда) в МДП-транзисторе при $U_{ЗИ} > U_{ЗИ, \text{пор}}$: а – $U_{СИ} < U_{ЗИ, \text{пор}}$, б – $U_{СИ} \approx U_{ЗИ, \text{пор}}$, в – $U_{СИ} > U_{ЗИ, \text{пор}}$

напряжения на стоке (дрейф под действием поля в канале), поэтому с

увеличением напряжения на стоке растут дрейфовая скорость носителей заряда, а также ток стока.

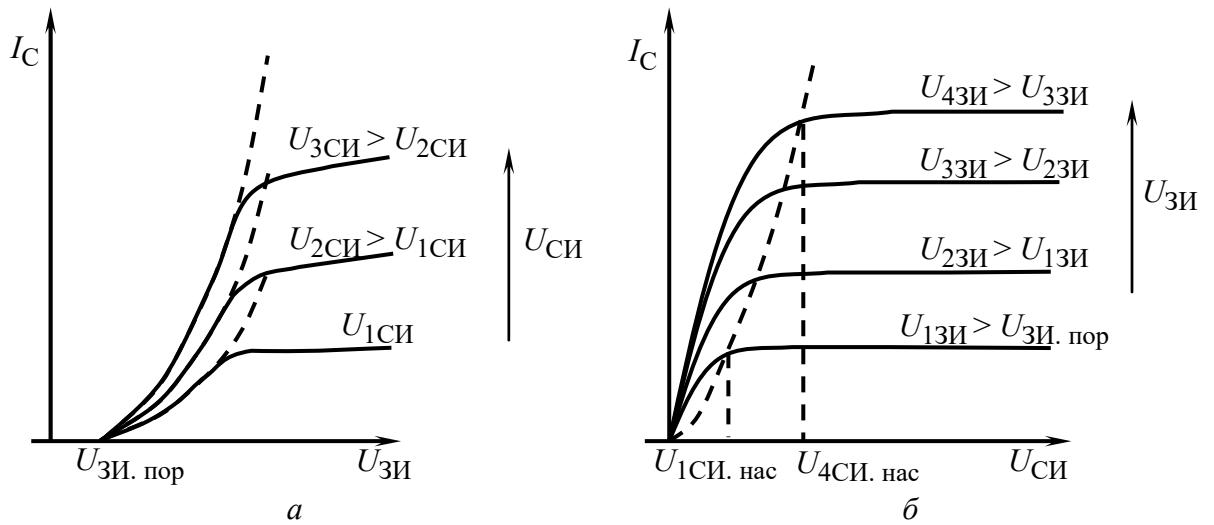


Рис 4.3 ВАХ МДП-транзистора: *а* – передачи; *б* – выходные

По характеристике передачи можно найти основной параметр, определяющий усиительные свойства прибора – крутизну характеристики передачи $S = d/d$ при $U_{\text{СИ}} = \text{const}$.

Выходные статические характеристики МДП-транзистора – это зависимости тока стока I_C от напряжения на стоке относительно истока $U_{\text{СИ}}$: $I_C = f(U_{\text{СИ}})$ при различных фиксированных напряжениях на затворе $U_{\text{ЗИ}}$ (рис. 4.3, *б*).

При напряжении на затворе, большем порогового напряжения, характеристика выходит из начала координат. Вначале она линейна и проходит под углом, соответствующим сопротивлению канала между стоком и истоком в открытом состоянии транзистора, $R_{\text{СИ. отк}} = U_{\text{СИ}}/I_C$ (см. рис. 4.2, *а*). Затем характеристика сублинейна: при увеличении напряжения на стоке канал из-за прохождения по нему тока стока сужается к стоку (становится неэквипотенциальным – см. рис. 4.2, *б*). Сопротивление канала растет, что и является причиной замедленного роста тока стока при возрастании напряжения на стоке. Эту часть характеристики называют крутой частью.

При напряжении на стоке $U_{\text{СИ. нас}}$ – *напряжении насыщения*, примерно равном напряжению на затворе, происходит перекрытие канала около стока, ток стока достигает значения тока стока насыщения – $I_{\text{C. нас}}$. Дальнейшее увеличение напряжения на стоке вызывает очень малое приращение тока стока (см. рис. 4.2, *в*), при этом носители экстрагируются из канала полем стокового *p-n*-перехода. Эту часть характеристики называют пологой. По

пологой части характеристики можно определить активную составляющую выходной проводимости транзистора $g_{22И} = dI_C/dU_{СИ}$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$.

При увеличении напряжения на затворе с возрастанием концентрации носителей заряда в канале при малых напряжениях на стоке увеличивается ток стока (характеристики имеют больший наклон) и возрастает напряжение насыщения, поэтому вся характеристика смещается в область больших токов стока.

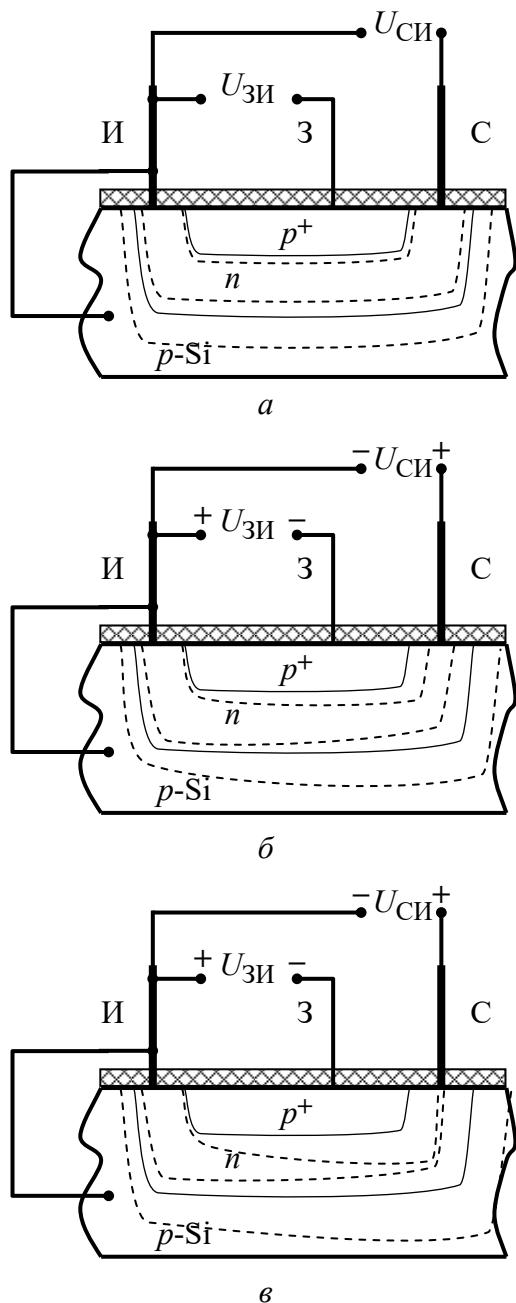


Рис. 4.4. Изменение формы канала (и области объемного заряда) в полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом: *а* – $U_{СИ} = U_{ЗИ} = 0$; *б* – $U_{СИ} \sim U_{ЗИ}$; *в* – $U_{СИ} > U_{ЗИ}$

транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом: *а* – $U_{СИ} = U_{ЗИ} = 0$; *б* – $U_{СИ} \sim U_{ЗИ}$; *в* – $U_{СИ} > U_{ЗИ}$

ток стока быстро растет (ВАХ линейна), затем с ростом напряжения на стоке

Структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом показана на рис. 4.1, *б*. В нем канал уже существует, а модуляция сопротивления канала и, следовательно, управление током стока происходит при изменении обратного напряжения на $p-n$ -переходе затвора: изменяются геометрические размеры канала, но не изменяется концентрация носителей в канале (рис. 4.4). С увеличением напряжения на затворе растет толщина $p-n$ -перехода и сужается толщина канала, следовательно, растет сопротивление канала протекающему через него току стока. Поэтому, здесь (в отличие от МДП-транзистора) ток стока с ростом напряжения на затворе уменьшается (рис. 4.5, *а* – ВАХ передачи), и при некотором напряжении $U_{ЗИ}$ отс – напряжении отсечки – канал полностью перекрывается областью объемного заряда, т. е. сток полностью отсекается от истока. В этом случае ток стока минимальный, он определяется только током обратно смещенного $p-n$ -перехода.

При фиксированном напряжении на затворе (рис. 4.5, *б* – выходная ВАХ) вначале при малом напряжении на стоке

область p - n -перехода расширяется в сторону стока (рис. 4.4, δ), что приводит к сужению канала, и следовательно, к росту сопротивления канала и замедлению роста тока стока (участок сублинейный). Это соответствует крутому участку ВАХ. Далее канал, сужаясь, практически не изменяет своей толщины (рис. 4.4, ϵ), и ВАХ переходит в область насыщения – ток стока меняется незначительно (рис. 4.5, δ).

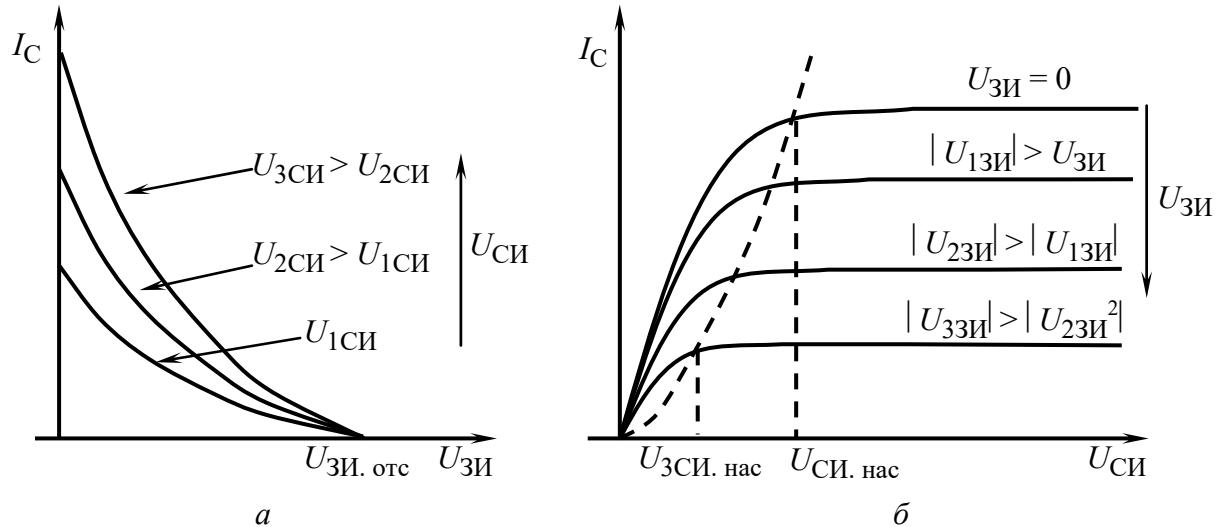


Рис. 4.5. ВАХ полевого транзистора с управляемым p - n -переходом:
 a – передачи; δ – выходные

Таким образом, вид выходной ВАХ совпадает с видом ВАХ МДП-транзистора, но при нулевом напряжении на затворе ток стока максимальный. С увеличением напряжения на затворе ток стока уменьшается, и при большем напряжении на затворе (по абсолютному значению) выходная ВАХ полевого транзистора с управляемым p - n -переходом (в отличие от МДП-транзистора с индуцированным каналом) смещается в область меньших токов.

4.2. Описание установки

Статические характеристики полевых транзисторов исследуют с помощью установки, схема которой приведена на рис. 4.6. Напряжения на затвор и на сток исследуемого транзистора подают от регулируемых источников постоянного напряжения $G1$ и $G2$. Напряжение на затворе относительно истока измеряют вольтметром $PU1$, напряжение на стоке относительно истока – вольтметром $PU2$. Ток стока измеряют миллиамперметром PA .

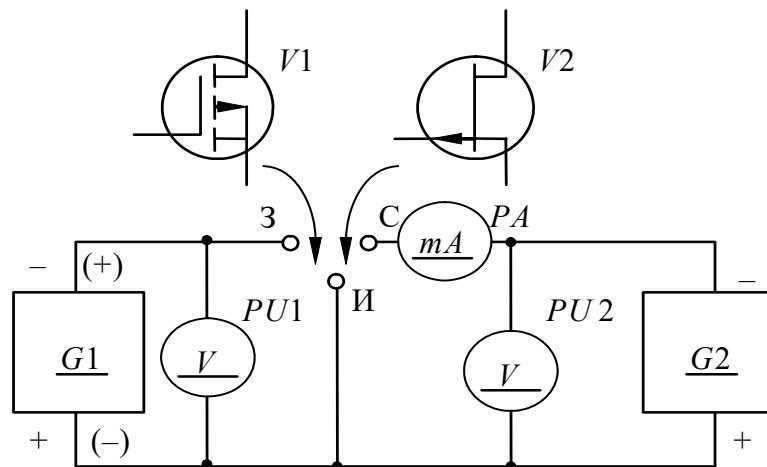


Рис. 4.6. Схема установки для исследования статических характеристик полевых транзисторов

4.3. Проведение измерений

Переключателем S (на макете) подключить к схеме МДП-транзистор с индуцированным каналом ($V1$).

Выходные статические характеристики исследуют при заданных напряжениях на затворе. Подать необходимое напряжение на затвор (табл. 4.1). Изменять напряжение на стоке от 0 до 3 В через 0,5 В и далее через 1 В до 14 В и измерять ток стока, замыкая переключатель "Измерение".

Таблица 4.1

Выходные характеристики					Характеристики передачи		
$U_{СИ}$, В	I_C , мА				$U_{ЗИ}$, В	I_C , мА	
	$U_{ЗИ} = 4$ В	$U_{ЗИ} = 6$ В	$U_{ЗИ} = 8$ В	$U_{ЗИ} = 10$ В		$U_{СИ} = 1$ В	$U_{СИ} = 10$ В

Характеристики передачи исследуют при заданных напряжениях на стоке. Подать необходимое напряжение на сток (см. табл. 4.1), изменять напряжение на затворе от 0 до 10 В через 1 В и измерять ток стока. Напряжение на стоке поддерживать постоянным. Закончив исследования, уменьшить напряжения источников питания $G1$ и $G2$ до нуля.

Переключателем S подключить к схеме полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом ($V2$) и провести аналогичные исследования. При исследовании выходных статических характеристик напряжения на затворе устанавливать в соответствии с табл. 4.2. Изменять напряжение на стоке от 0 до 3 В через 0,5 В и далее через 1 В до 8 В и измерять ток стока. При исследовании характеристик передачи установить напряжение на стоке в соответствии с табл. 4.2, изменять напряжение на затворе от 0 до 0,8 В через 0,1 В и измерять ток стока. Напряжение на стоке поддерживать постоянным.

Таблица 4.2

Выходные характеристики					Характеристики передачи		
$U_{СИ}$, В	I_C , мА				$U_{ЗИ}$, В	I_C , мА	
	$U_{ЗИ} = 0$	$U_{ЗИ} = 0,2$ В	$U_{ЗИ} = 0,4$ В	$U_{ЗИ} = 0,6$ В		$U_{СИ} = 1$ В	$U_{СИ} = 7$ В

Следует обратить внимание на разный характер изменения тока стока при увеличении напряжения на затворе полевых транзисторов $V1$ и $V2$.

4.4. Обработка результатов и расчет параметров

1. По данным табл. 4.1 построить семейство выходных статических характеристик и характеристики передачи МДП-транзистора с индуцированным каналом.

2. По характеристике передачи, полученной при $U_{СИ} = 10$ В, определить пороговое напряжение МДП-транзистора с индуцированным каналом как напряжение на затворе, при котором ток стока равен 10 мкА.

3. Используя эту же характеристику, вычислить крутизну характеристики передачи МДП-транзистора:

$$S \approx \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ}=\text{const}}$$

при $U_{ЗИ} = 8$ В.

4. По выходной статической характеристике, полученной при $U_{ЗИ} = 10$ В, определить сопротивление "сток–исток" в открытом состоянии транзистора

$$R_{СИ, \text{ отк}} = U_{СИ} / I_C$$

при $U_{СИ} = 1$ В.

5. Оценить длину канала МДП-транзистора l , используя соотношение

$$l = b \mu_n C_{\text{уд}} R_{СИ, \text{ отк}} (U_{ЗИ} - U_{ЗИ, \text{ пор}}),$$

где $b = 100$ мкм – ширина канала; $\mu_n = 700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность носителей заряда в канале; $C_{\text{уд}} = 2,4 \cdot 10^{-8} \Phi/\text{см}^2$ – емкость слоя диэлектрика под затвором единичной площади; $U_{ЗИ} = 10$ В.

6. По выходной статической характеристике при $U_{ЗИ} = 8$ В и при $U_{СИ} = 10$ В определить активную составляющую выходной проводимости МДП-транзистора как

$$g_{22\text{и}} \approx \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{СИ}} \right|_{U_{ЗИ}=\text{const}}.$$

7. Вычислить собственный коэффициент усиления по напряжению МДП-транзистора $K_U = S/g_{22}$ для рабочей точки, в которой были определены крутизна и активная составляющая выходной проводимости.

8. По данным табл. 4.2 построить семейство выходных статических характеристик передачи полевого транзистора с управляемым $p-n$ -переходом.

9. Определить напряжение отсечки полевого транзистора с управляемым $p-n$ -переходом как напряжение на затворе, при котором ток стока становится равным 10 мкА.

4.5. Контрольные вопросы

1. Объясните конструктивные особенности и принцип действия МДП-транзистора с индуцированным каналом и полевого транзистора с управляемым $p-n$ -переходом.
2. Объясните выходные статические характеристики различных типов полевых транзисторов.
3. Объясните статические характеристики передачи различных типов полевых транзисторов.
4. Что такое пороговое напряжение?
5. Что такое напряжение насыщения?
6. Что такое напряжение отсечки?

Лабораторная работа 10

10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ И СТАБИСТОРА

10.1. Основные понятия и определения

Цель работы – исследование ВАХ и основных параметров полупроводниковых стабилитронов и стабистора.

Полупроводниковый стабилитрон – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения. Полупроводниковый стабистор – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном его диапазоне. Стабистор, как и стабилитрон, предназначен для стабилизации напряжения.

В зависимости от физических явлений, приводящих к электрическому пробою, различают лавинный и туннельный пробои. Лавинный пробой обусловлен лавинным размножением носителей заряда под действием электрического поля. Он наблюдается в широких p - n -переходах. В этом случае носители заряда, проходя через переход, ускоряются в сильном электрическом поле на длине свободного пробега и приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника. Вновь возникающие электронно-дырочные пары тоже ускоряются полем, поэтому ударная ионизация сопровождается размножением носителей заряда, что приводит к увеличению тока. Туннельный пробой связан с туннельным эффектом. Туннелирование возможно, если толщина потенциального барьера довольно мала. Такие условия возникают в узких p - n -переходах при определенной напряженности электрического поля, когда имеет место большой наклон энергетических зон. В этом случае электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости без изменения энергии – туннелируют сквозь узкий потенциальный барьер благодаря своим квантово-механическим свойствам. Вероятность туннелирования очень сильно зависит от напряженности электрического поля. Туннельный эффект приводит к росту тока.

Таким образом, при лавинном и туннельном пробоях диода происходит резкое увеличение обратного тока при малых изменениях обратного напряжения. Это свойство и используется для создания приборов, стабилизирующих напряжение, – стабилитронов.

Для характеристики свойств стабилитронов и стабисторов используют ряд параметров. Напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ – это значение напряжения на стабилитроне при прохождении заданного тока. Пробивное напряжение диода, а значит, и напряжение стабилизации стабилитрона зависит от толщины p - n -перехода и, следовательно, от удельного объемного сопротивления базы диода. Поэтому разные стабилитроны имеют различные напряжения стабилизации (от 3 до 400 В). Низковольтные стабилитроны ($U_{\text{ст}} < 6$ В) изготавливают на основе сильнолегированного кремния. В них наблюдается туннельный пробой. Высоковольтные стабилитроны ($U_{\text{ст}} > 6$ В) делают из слаболегированного кремния. Их работа связана с лавинным пробоем. Малые напряжения стабилизации стабисторов (0,7...2 В) определяются прямым смещением p - n -переходов нескольких последовательно включенных диодов (от одного до трех).

Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha_{\text{ст}}$ – это величина, определяемая отношением относительного изменения напряжения стабилизации к изменению температуры окружающей среды при неизменном токе стабилитрона или стабистора:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{dU_{\text{ст}}}{dT}.$$

В обобщенной по многим стабилитронам зависимости $\alpha_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ этот параметр положителен у высоковольтных и отрицателен – у низковольтных стабилитронов, что связано с различной температурной зависимостью напряжения при лавинном и туннельном пробоях. Изменению знака $\alpha_{\text{ст}}$ соответствует напряжение стабилизации $U_{\text{ст}} \approx 6$ В. У стабисторов $\alpha_{\text{ст}}$ отрицателен.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона (стабистора) $r_{\text{ст}}$ – это отношение приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его малому приращению тока в режиме стабилизации

$$r_{\text{ст}} = \frac{dU}{dI}.$$

Обобщенная зависимость $r_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ у стабилитронов выражается кривой с минимумом при $U_{\text{ст}} \approx 6$ В. При больших напряжениях стабилизации стабилитронов этот параметр возрастает, что обусловлено влиянием объемного сопротивления базы. При уменьшении напряжения стабилизации

он также растет в связи с меньшим числом туннельных переходов при увеличении уровня легирования p - и n -областей диодной структуры.

10.2. Установка для исследований

Исследование стабилитрона (стабистора) проводят на установке, схема которой изображена на рис. 10.1. Резистор $R1$ предназначен для ограничения тока, проходящего от регулируемого источника питания G через исследуемый диод VD при лавинном или туннельном пробое или при прямом смещении его электронно-дырочного перехода. Для измерения тока, протекающего через стабилитрон (стабистор), и напряжения на нем используется один

универсальный электронный прибор. Характер измеряемой величины (тока или напряжения) определяется положением переключателя рода работ на передней панели универсального прибора. При нажатой кнопке " $U_{ст}$ " переключателя $S1$ (" $U_{ст}$ " – " $U_{вх}$ " – " $I_{ст}$ ") универсальный прибор включен в схему как вольтметр PV и может измерять

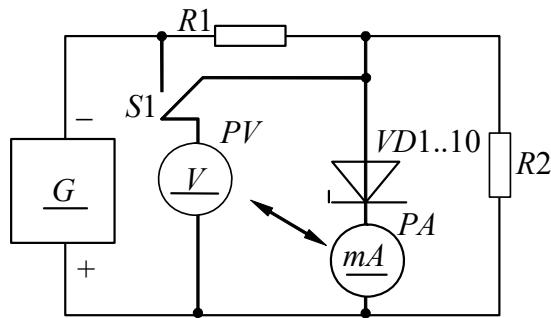


Рис. 10.1. Схема для исследования стабилитронов и стабистора

напряжение на стабилитроне или стабисторе, при нажатой кнопке " $U_{вх}$ " – напряжение на входе схемы. В положении " $I_{ст}$ " универсальный прибор включен в схему как амперметр PA и может измерять ток, текущий через стабилитрон, стабистор, или ток в цепи параметрического стабилизатора напряжения (соответствующая этому положению коммутация на схеме не показана).

Кнопочный переключатель $S2$ (на рисунке не показан) позволяет включить в схему один из восьми стабилитронов, предназначенных для исследования, и стабистор (кнопка 10). Стабилитрон 9 (должна быть нажата кнопка 9 переключателя $S2$) предназначен для исследования в схеме параметрического стабилизатора напряжения с нагрузкой (резистор $R2$).

В установке предусмотрен нагрев стабилитронов и стабистора в термостате до температуры 75 °C для определения температурных коэффициентов напряжения стабилизации различных диодов. Включают нагрев термостата переключателем $S3$, который на схеме не показан.

10.3. Порядок проведения исследований

10.3.1. Исследование ВАХ стабилитрона

С помощью переключателя $S2$ включить в схему один из стабилитронов (по указанию преподавателя). Первоначальные исследования стабилитронов надо провести при комнатной температуре. Поэтому кнопки переключателя $S3$ не должны быть нажаты – нагреватель и вентилятор выключены. Напряжение на стабилитроне и ток через него изменять нужно с помощью регулятора G . Первую часть характеристики со слабой зависимостью тока от напряжения нужно исследовать, устанавливая напряжение на стабилитроне и измеряя ток как функцию напряжения. Вторую часть характеристики, соответствующую резкому росту тока с ростом напряжения (что связано с электрическим пробоем $p-n$ -перехода), необходимо исследовать, устанавливая ток и измеряя мало изменяющееся напряжение.

При измерении напряжения на стабилитроне кнопка " $U_{ст}$ " на лабораторном стенде должна быть нажата, а переключатель рода работ универсального прибора – находиться в положении " U ". При измерении тока, текущего через стабилитрон, на стенде необходимо нажать кнопку " $I_{ст}$ ", а переключатель рода работ универсального прибора установить в положение " I ". Результаты измерений записать в виде таблицы.

ВАХ стабистора – это обычная зависимость прямого тока диода от напряжения (см. лабораторную работу 2).

10.3.2. Исследование параметров стабилитронов

Измерить напряжения на стабилитронах 1...8 и стабисторе при токе 10 мА. Результаты измерений записать в табл. 10.1, фиксируя **все значащие цифры** показаний электронного вольтметра.

Таблица 10.1.

Исследуемая величина	Номер стабилитрона								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_1 , В (при 20 °C и $I = 10$ мА)									
U_2 , В (при 20 °C и $I = 5$ мА)									
U_3 , В (при 75 °C и $I = 10$ мА)									
$\alpha_{ст}$, К ⁻¹									
$r_{ст}$, Ом									

То же самое повторить при протекающем через стабилитроны (стабистор) токе 5 мА, устанавливая для каждого диода это значение тока регулятором G при нажатой кнопке " $I_{ст}$ " и переключателе рода работ универсального прибора в положении " I ".

Для исследования диодов при температуре 75 °C включить термостат переключателем $S3$. При достижении заданной температуры будет

периодически отключаться индикаторный светоизлучающий светодиод (СИД). После этого опять измерить напряжения на стабилитронах и стабисторе при токе 10 мА. Результаты измерений занести в таблицу.

10.3.3. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

Для исследования простейшего стабилизатора напряжения, состоящего (см. рис. 10.1) из резистора $R1$, стабилитрона $VD10$ и нагрузки (резистор $R2$), надо нажать кнопку 10 переключателя $S2$, а переключатель рода работ универсального прибора установить в положение " U ". Изменяя входное напряжение от 7 В до максимального значения через 1 В (измерять входное напряжение при нажатой кнопке " $U_{\text{вх}}$ "), измерять напряжение на выходе стабилизатора (при нажатой кнопке " $U_{\text{ст}}$ ").

После окончания работы кнопкой "Охлажд." включить вентилятор для охлаждения термостата.

10.4. Обработка экспериментальных результатов и расчет параметров

1. Построить график обратной ветви ВАХ стабилитрона.
2. Рассчитать температурные коэффициенты напряжения стабилизации для каждого из стабилитронов 1...8 и стабистора 9 при неизменном токе 10 мА:

$$\alpha_{\text{ст}} \approx \frac{2}{U_1 + U_3} \frac{U_3 - U_1}{T_2 - T_1}.$$

Рассчитать дифференциальные сопротивления стабилитронов (стабистора) по формуле

$$r_{\text{ст}} \approx \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}.$$

Расчетные данные записать в табл. 10.1 и построить зависимости $\alpha_{\text{ст}}$ и $r_{\text{ст}}$ от напряжения стабилизации исследованных диодов (с 1-го по 8-й).

3. Построить график зависимости выходного напряжения параметрического стабилизатора напряжения от входного напряжения.

10.5. Контрольные вопросы

1. Что такое лавинный пробой диодов?
2. Что такое туннельный пробой диодов?
3. Что такое температурный коэффициент напряжения стабилизации? Какие свойства стабилитрона он характеризует? Объясните зависимость этого коэффициента от напряжения стабилизации для различных стабилитронов.
4. Что такое полупроводниковый стабистор?

5. Каков принцип действия параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне?
6. Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления стабилитронов?

Лабораторная работа 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА

11.1. Основные понятия и определения

Цель работы – исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) тиристора и основных параметров триодного управляемого тиристора при разных температурах.

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя (или более) взаимодействующими p - n -переходами. При подаче напряжения в прямом направлении тиристор может находиться в двух устойчивых состояниях (может переключаться из закрытого состояния в открытое), поэтому тиристор используется в качестве электронного ключа.

Структура тиристора состоит из областей полупроводника с чередующимися типами электропроводности (рис. 11.1). Крайнюю p -область такой структуры называют *анодом* – А, так как при прямом включении к ней приложен положительный потенциал. Крайнюю n -область называют *катодом* – К, к ней приложен отрицательный потенциал.

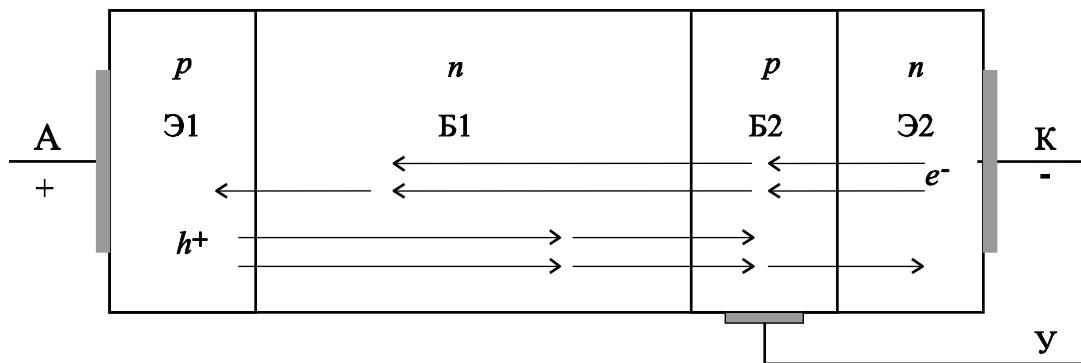


Рис. 11.1. Структура тиристора

При таком включении крайние p - n -переходы включены в прямом направлении, поэтому их называют *эмиттерными*, средний p - n -переходмещен в обратном направлении, поэтому его называют *коллекторным*. Соответственно в таком приборе существуют две эмиттерные области (p - и n -эмиттеры – Э1 и Э2) и две базовые области (n - и p -базы – Б1 и Б2).

Так же, как в диоде или в биполярном транзисторе, ток в эмиттерном переходе определяется в основном инжекцией носителей из эмиттера в базу, для чего концентрация примесей в областях эмиттеров существенно больше, чем в областях баз. Для взаимодействия между переходами базовые области тиристора, так же как в биполярном транзисторе, должны быть относительно тонкими. В триодном тиристоре одна из этих областей имеет внешний вывод, называемый *управляющим электродом*. Чаще всего управляющий электрод

подключается к *p*-базе (управление по катоду), прилегающей к эмиттеру с низким потенциалом.

При прямом включении (см. рис. 11.1) большая часть внешнего напряжения падает на коллекторном переходе, так как он смещен в обратном направлении и имеет высокое сопротивление. Поэтому участок 1 прямой ветви ВАХ похож на обратную ветвь ВАХ выпрямительного диода (рис. 11.2, *a*).

С увеличением внешнего анодного напряжения U_A (с увеличением потенциала анода относительно катода) до значения близкого к $U_{\text{вкл}}$ увеличиваются как обратное напряжение на коллекторном переходе, так и прямые напряжения на эмиттерных переходах. Электроны, инжектированные из *n*-эмиттера ($\mathcal{E}2$) в *p*-базу ($\mathcal{B}2$), диффундируют через тонкую базу к коллекторному переходу, втягиваются (экстрагируются) полем этого перехода и попадают в *n*-базу ($\mathcal{B}1$), где они являются основными носителями заряда.

Дальнейшему продвижению электронов по структуре тиристора препятствует небольшой потенциальный барьер левого эмиттерного перехода. Поэтому часть электронов, оказавшихся в потенциальной яме *n*-базы, образуют избыточный отрицательный заряд, который, понижая высоту потенциального барьера левого эмиттерного перехода, вызывает увеличение инжекции дырок из *p*-эмиттера в *n*-базу.

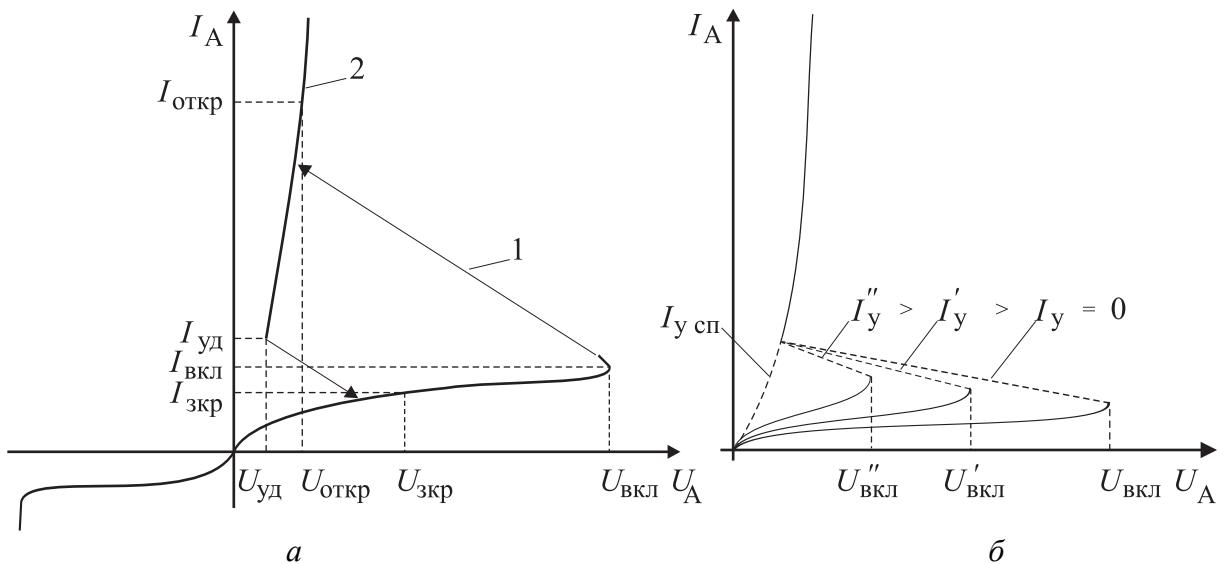


Рис. 11.2. ВАХ тиристоров: *a* – диодного; *б* – триодного

Инжектированные дырки диффундируют к коллекторному переходу, втягиваются полем коллекторного перехода и попадают в *p*-базу. Дальнейшему их продвижению по структуре тиристора препятствует небольшой потенциальный барьер правого эмиттерного перехода.

Следовательно, в p -базе происходит накопление избыточного положительного заряда, что обуславливает увеличение инжекции электронов из n -эмиттера. Таким образом, в структуре тиристора существует положительная обратная связь по току – увеличение тока через один эмиттерный переход приводит к увеличению тока через другой эмиттерный переход.

Накопление неравновесных носителей заряда в базовых областях равносильно возникновению дополнительной разности потенциалов на коллекторном переходе, которая, в отличие от внешней разности потенциалов (задаваемой внешним источником питания), стремится сместить коллекторный переход в прямом направлении. Поэтому с увеличением тока через тиристор и, следовательно, с увеличением числа избыточных зарядов основных носителей заряда в базовых областях абсолютное значение суммарного напряжения на коллекторном переходе вначале уменьшается до нуля, а затем возрастает – коллекторный переход включается в прямом направлении. То есть высота потенциального барьера коллекторного перехода уменьшается до значения, соответствующего включению этого перехода в прямом направлении. Если последовательно с тиристором в цепи включен резистор R (рис. 11.3), то в этом случае ток через тиристор будет ограничен, в основном, только сопротивлением этого резистора и ЭДС источника питания (см. рис. 11.2, a – участок 2). Падение напряжение на тиристоре $U_{\text{откр}}$ определяется суммарным падением на $p-n$ -переходах и, в основном, на области n -базы тиристора и составляет единицы вольт.

Таким образом, тиристор при подаче на него прямого напряжения может находиться в двух устойчивых состояниях: закрытом и открытом. Очевидно, чтобы тиристор переключить из закрытого состояния в открытое, необходимо в его базах накопить определенный заряд, равный критическому заряду $Q_{\text{кр}}$, который создает разность потенциалов, компенсирующую падение напряжения на коллекторном переходе от внешнего источника напряжения.

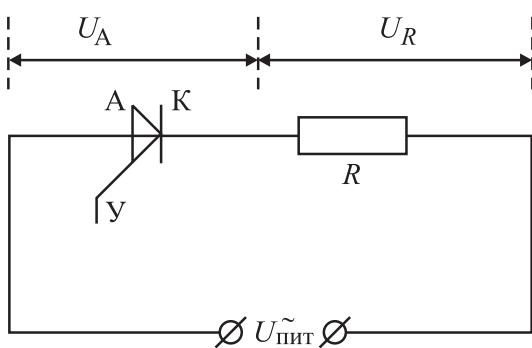


Рис. 11.3. Схема включения тиристора

Закрытое состояние тиристора соответствует участку прямой ветви ВАХ между нулевым напряжением и напряжением включения – $U_{\text{вкл}}$. Под напряжением включения (напряжением переключения) понимают точку на ВАХ, в которой дифференциальное сопротивление равно нулю, а напряжение

на тиристоре достигает максимального значения. То есть в закрытом состоянии (участок 1 на рис. 11.2, *a*) к тиристору можно приложить большое напряжение, а ток при этом будет мал. Значение этого тока $I_{зкр}$ удобно измерять при напряжении на тиристоре $U_{зкр}$, равном примерно половине от $U_{вкл}$.

Открытое состояние тиристора соответствует низковольтному и низкоомному участку прямой ветви ВАХ (участок 2 на рис. 11.2, *a*). Между первым и вторым участками ВАХ находится переходный участок (участок отрицательного дифференциального сопротивления, на котором наблюдается рост анодного тока при уменьшении анодного напряжения), соответствующий неустойчивому состоянию тиристора. Особенно значительно проявляется неустойчивость при относительно малом сопротивлении нагрузки во внешней цепи тиристора: переключение тиристора из закрытого состояния в открытое и обратно происходит по штриховым линиям (см. рис. 11.2, *a*), наклон которых и определяется малым сопротивлением нагрузки R .

В открытом состоянии тиристор будет находиться до тех пор, пока за счет проходящего тока будет поддерживаться избыточный заряд в базах, необходимый для смещения коллекторного перехода в прямом направлении. Если же ток через тиристор уменьшить до некоторого значения, меньшего *удерживающего тока* $I_{уд}$ (см. рис. 11.2, *a*), то (в основном за счет рекомбинации) уменьшится количество неравновесных носителей заряда в базовых областях тиристора, и произойдет перераспределение падений напряжения на выпрямляющих переходах: коллекторный переход окажется смещенным в обратном направлении, а эмиттерные – в прямом. Большая часть внешнего напряжения вновь окажется на коллекторном переходе. Вследствие этого уменьшится инжекция из эмиттерных областей, и тиристор перейдет в закрытое состояние. Таким образом, удерживающий ток – это минимальный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии.

При обратном напряжении на тиристоре эмиттерные переходы включены в обратном направлении, а коллекторный – в прямом. Зависимость тока, протекающего через тиристор, от напряжения подобна обратной ветви ВАХ диода (см. рис. 11.2, *a*), резкое возрастание тока происходит при пробое эмиттерных переходов.

Как говорилось ранее, для перехода тиристора из закрытого состояния в открытое требуется накопление в базовых областях определенного

(критического) заряда, необходимого для возникновения положительной обратной связи между эмиттерными переходами. В диодном тиристоре (т. е. в случае, когда либо отсутствует управляющий электрод, либо на него не подано никакого напряжения) это происходит при определенном напряжении ($U_{вкл}$) и при определенном токе ($I_{вкл}$), так как в последовательной структуре тиристора ток ограничен обратным током коллекторного перехода и определяется генерацией носителей в области перехода и концентрацией неосновных носителей заряда в прилегающих к переходу областях. Достижение критического заряда в базовых областях, т. е. достижение $I_{вкл}$, в диодном тиристоре возможно при увеличении внешнего напряжения до $U_{вкл}$. Увеличение температуры также приводит к увеличению концентрации неосновных носителей заряда и, следовательно, к увеличению обратного тока при неизменном напряжении. Таким образом, с ростом температур напряжение включения тиристора $U_{вкл}$ уменьшается.

Наличие управляющего электрода позволяет управлять инжекцией носителей заряда в одном из эмиттерных переходов независимо от внешнего анодного напряжения. В этом случае ток управляющего электрода (I_y) играет роль тока базы в биполярном транзисторе. Увеличение этого тока приводит к росту тока инжекции соответствующего эмиттерного перехода и достижению критического заряда, т. е. переключению тиристора, при меньшем напряжении между анодом и катодом $U_{вкл}$. Таким образом, напряжение включения тиристора уменьшается с увеличением тока управления (см. рис. 11.2, б). При достаточно большом токе управления (токе спрямления – $I_{y, сп}$) тиристор можно сразу перевести в открытое состояние, минуя участок отрицательного дифференциального сопротивления.

Особенностью тиристоров является то, что управляющий ток может иметь форму короткого импульса. Он может протекать лишь до тех пор, пока тиристор не переключится в проводящее состояние, и механизм внутреннего усиления сможет поддерживать его в этом состоянии. При использовании же биполярного транзистора в качестве электронного ключа, включенное состояние сохраняется только пока идет входной ток (например, ток базы), что требует значительно большей мощности управления.

Для выключения тиристора необходимо уменьшить анодный ток до значений, меньших удерживающего тока. Если в качестве источника анодного питания используется генератор постоянного тока, то для диодного тиристора этого можно достичь, практически лишь уменьшая анодное напряжение (для

выключения биполярного транзистора достаточно уменьшить входной ток). Использование тиристоров на переменном токе снимает такую проблему, так как в этом случае ток дважды за период проходит через нулевое значение.

На рис. 11.3 представлена схема тиристора, включенного последовательно с активным сопротивлением нагрузки R и источником питания $U_{\text{пит}}$ переменного напряжения. Для любого момента времени справедливо соотношение $U_{\text{пит}} = U_A + U_R$. Если амплитуда переменного напряжения больше напряжения включения (рис. 11.4, *a*), то тиристор остается выключенным до момента t_1 , пока переменное напряжение не достигнет значения $U_{\text{вкл}}$. До этого момента практически все напряжение падает на тиристоре U_A . В момент t_1 тиристор переключается, и все напряжение оказывается на нагрузке U_R . Так продолжается до момента времени t_2 , пока ток в цепи не уменьшится до значения удерживающего тока: тиристор закрывается, и с этого момента все напряжение опять падает на тиристоре. При отрицательной полуволне тиристор также закрыт.

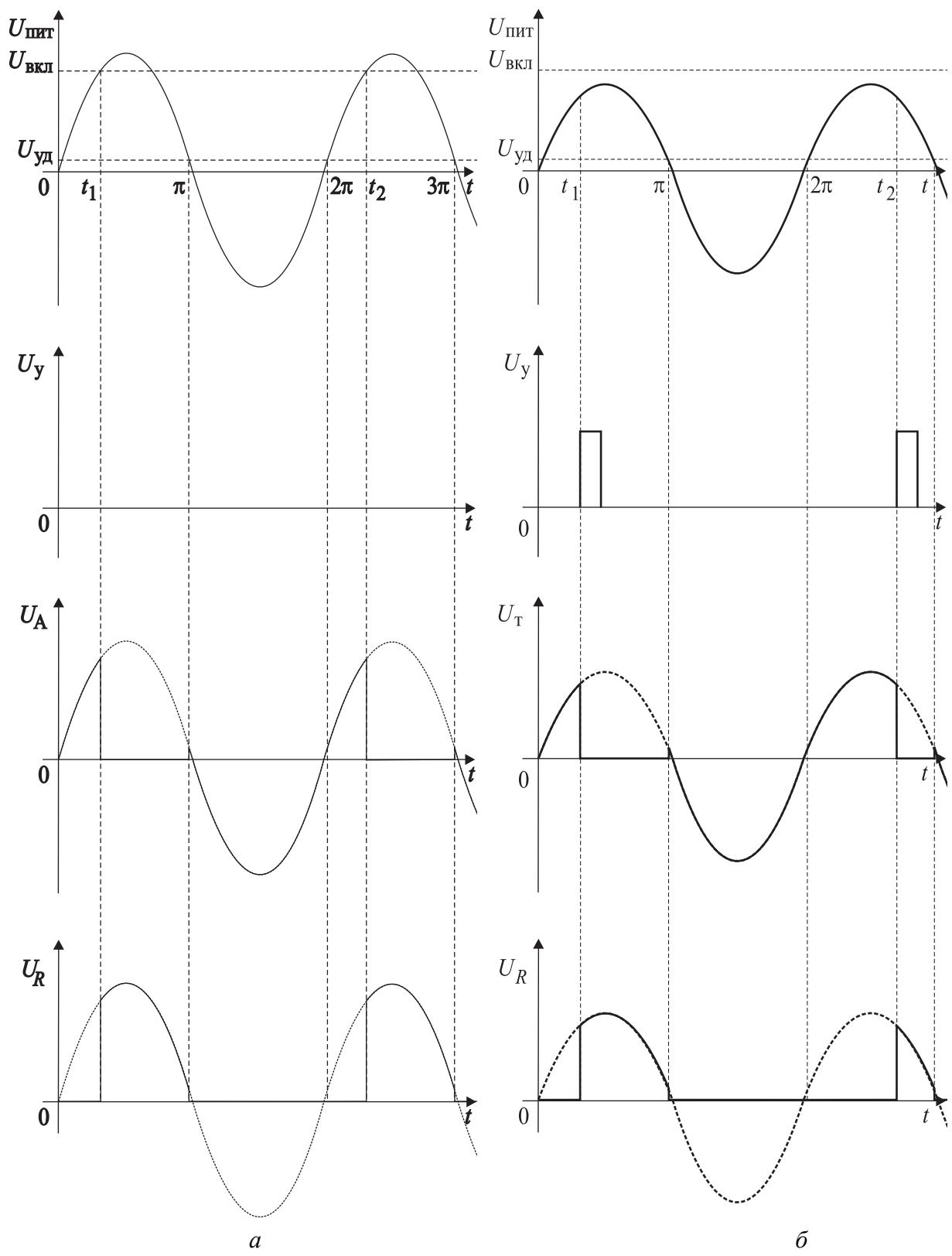


Рис. 11.4 Осциллограммы напряжений в схемах: *а* – с диодным тиристором; *б* – триодным тиристором

Одно из применений тиристоров связано с регулировкой мощности в цепях переменного тока (см. рис. 11.3). Если тиристор последовательно с активным сопротивлением нагрузки R включен в цепь переменного тока, напряжение источника питания которого меньше $U_{вкл}$, то без тока

управления тиристор закрыт, все напряжение падает на тиристоре, и ток в нагрузке практически отсутствует. В момент времени t_1 (рис. 11.4, б), при положительной полуволне напряжения на тиристоре, через управляющий электрод подается короткий импульс тока управления, тиристор открывается, и напряжение источника питания оказывается приложенным к нагрузке, через которую идет ток практически до окончания прямой полуволны напряжения (пока ток не станет меньше удерживающего тока). В течение обратной полуволны тиристор не пропускает ток, и лишь при следующей прямой полуволне в момент времени t_2 при импульсе управляющего тока тиристор снова открывается. Изменяя моменты времени открывания тиристора t_1 и t_2 , можно плавно регулировать мощность, выделяющуюся в сопротивлении нагрузки. Этот способ регулировки называют фазовым управлением.

Как отмечалось ранее (см. рис. 11.2, б), увеличение тока управления приводит к уменьшению напряжения включения тиристора. Поэтому изменять фазу открывания тиристора можно и изменяя значение постоянного тока управления. Однако при синусоидальном нарастании напряжения на тиристоре его включение будет происходить в момент времени ближе к началу периода (в то время как при импульсном токе управления время включения может быть выбрано практически произвольно на протяжении прямой полуволны – см. рис. 11.4, б). То есть с изменением значения постоянного тока управления будут изменяться фаза включения тиристора и мощность, выделяющаяся в нагрузке.

11.2. Описание установки

ВАХ тиристора в настоящей работе исследуют методом характеристиографа с помощью осциллографа С1-83 (рис 11.5). Генератор $G1$ обеспечивает напряжение одной полярности, синусоидально изменяющееся во времени (полусинусоида). Напряжение с генератора подается на горизонтальные пластины осциллографа ("X" канал I). Последовательно с тиристором включен токовый резистор R_T , напряжение с которого, пропорциональное току, протекающему через тиристор, подается на пластины вертикального отклонения осциллографа ("Y" канал II). При этом сопротивление токового резистора выбрано настолько малым, что падение напряжения на нем значительно меньше падения напряжения на тиристоре и не вносит погрешность в измерение этого напряжения, т. е. можно считать, что напряжение на тиристоре практически равно напряжению на генераторе.

Таким образом, на экране осциллографа будет наблюдаться зависимость тока, протекающего через тиристор, от напряжения, приложенному к нему в каждый момент времени, т. е. ВАХ тиристора наблюдается в пределах по току от нуля до максимального значения, обеспечиваемого генератором $G1$.

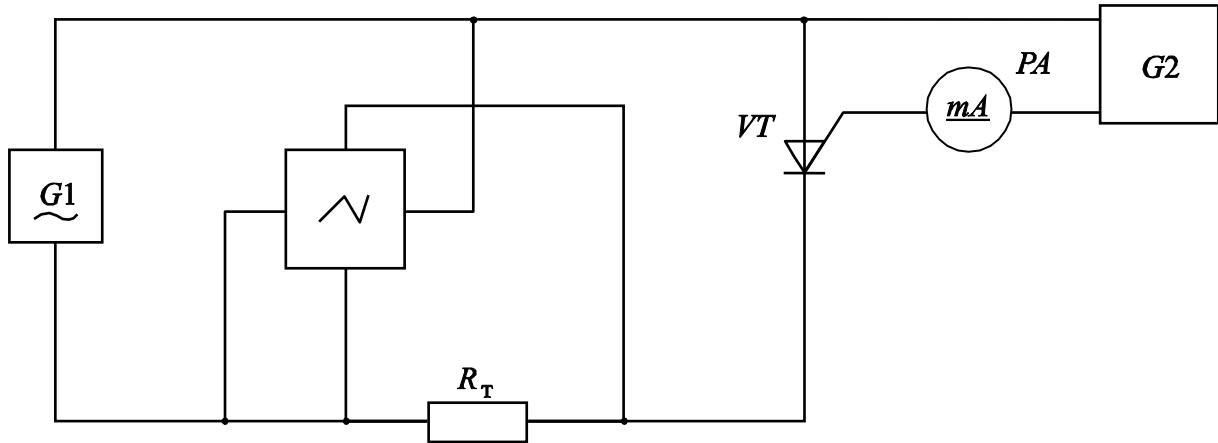


Рис. 11.5. Схема измерительной установки

К управляющей цепи тиристора подключен регулируемый источник тока $G2$, обеспечивающий ток управляющего электрода от 0 до 5 мА. Измерение тока управляющего электрода производят миллиамперметром PA .

Осциллограф С1-83 наряду с исследованием в режиме харктериографа дает возможность исследовать (в режиме временной развертки) зависимость тока, протекающего через тиристор (канал I), и напряжения на нем (канал II) от времени.

Тиристор, исследуемый в работе, помещен в термостат, обеспечивающий измерение параметров при двух фиксированных температурах: 20 и 50 °C.

11.3. Проведение исследований

11.3.1. Исследование вольт-амперной характеристики тиристора

Для исследования ВАХ тиристора включить осциллограф в режим харктериографа, для чего установить переключатель режима работы и переключатель синхронизации в положение " $X-Y$ ". Выбрать масштаб тока и напряжения по осям координат, установив переключатель чувствительности входов в положения: для канала I (" X ") – 2 В/дел $\times 10$ и для канала II (" Y ") – 1 мВ/дел $\times 10$. При закороченных входах осциллографа (положение переключателей входов " \perp ") с помощью регулировок " \uparrow " и " \leftrightarrow " установить светящуюся точку на экране в выбранное начало координат (в левом нижнем углу экрана – 1×1 дел) и регулировкой яркости и фокусировки получить ее четкое изображение. В дальнейшем при изменении масштабов по осям координат необходимо каждый раз проверять положение начала координат!

Установить переключатели входов осциллографа в положение открытого входа (" \equiv "), получить на экране и зарисовать на кальку оси координат и ВАХ тиристора в прямом направлении при токах управляющего электрода I_y , равных 1, 2, 3, 5 мА, и в обратном направлении. При $I_y = 5$ мА зарисовать ВАХ тиристора в открытом состоянии, увеличив масштаб по горизонтальной оси (канал I) до 50 мВ/дел $\times 10$. Отметить на осях координат масштаб напряжения и тока, учитывая, что масштаб тока по вертикальной оси $m_I = m_U/R_T$, где m_U – масштаб по напряжению канала II, а $R_T = 1$ Ом.

11.3.2. Измерение параметров тиристора

Пользуясь изображением вольт-амперной характеристики на экране осциллографа и учитывая масштаб по осям координат, измерить при комнатной температуре и записать в табл. 11.1 основные параметры тиристора: при $I_y = 1$ мА – ток тиристора в закрытом состоянии $I_{зкр}$ (при $U_{зкр}$, равном примерно половине от $U_{вкл}$), ток включения $I_{вкл}$, удерживающий ток $I_{уд}$ и напряжение включения $U_{вкл}$; при $I_y = 5$ мА – $U_{откр}$ (увеличив масштаб по горизонтальной оси до 20 мВ/дел $\times 10$), а также ток тиристора при включении его в обратном направлении – $I_{обр}$.

Таблица 11.1

$T, ^\circ\text{C}$	$I_y = 1$ мА				$I_y = 5$ мА	$I_{обр}$, мА
	$I_{зкр}$, мА	$I_{вкл}$, мА	$I_{уд}$, мА	$U_{вкл}$, В	$U_{откр}$, В	
20						
50						

11.3.3. Исследование зависимости напряжения включения тиристора от тока управляющего электрода

Исследовать зависимость напряжения включения тиристора от тока управляющего электрода при комнатной температуре. Результаты записать в табл. 11.2. Напряжение включения измерять по ВАХ на экране осциллографа.

Таблица 11.2

$T, ^\circ\text{C}$	$U_{вкл}$, В						
	$I_y = 1$ мА	$I_y = 1,5$ мА	$I_y = 2$ мА	$I_y = 2,5$ мА	$I_y = 3$ мА	$I_y = 3,5$ мА	$I_y = 4$ мА
20							
50							

11.3.4. Исследование параметров тиристора при повышенной температуре

Включить нагрев термостата. После достижения заданной температуры (через 3 – 5 мин) провести измерения, как описано в 11.3.2 и 11.3.3, для температуры 50 °С. Выключить нагрев термостата.

11.3.5. Исследование регулятора мощности

Включить осциллограф в режим временной развертки, для чего переключатель синхронизации установить в положение "I, II", а регулятор развертки установить в положение 2 мс/дел.

Установить переключатель режима работы в положение "II, X–Y". При этом на экране будет разворачиваться во времени сигнал, поступающий на вход канала II, т. е. напряжение на резисторе R_T (ср. рис. 11.4, a – кривая U_R при $0\dots\pi$), выступающем в роли нагрузки. Форма этого напряжения за период в точности повторяет форму тока, протекающего через тиристор, а значение тока через тиристор пропорционально падению напряжения на резисторе R_T . Поэтому можно утверждать, что ток, протекающий через тиристор пропорционален площади, ограниченной этой кривой и осью абсцисс t . Добиться устойчивого изображения регулировкой уровня синхронизации. Зарисовать на одном графике осциллограммы напряжения на нагрузке (от 0 до π) при токе управляющего электрода 0, 1, 3, 5 мА, отметив изменение фазового угла включения тиристора в зависимости от тока управляющего электрода.

Установить переключатель режима работы осциллографа в положение "I", тогда на экране будет разворачиваться сигнал, поступающий на вход канала I, т. е. напряжение, снимаемое с тиристора (ср. рис. 11.4, a – кривая U_A при $0\dots\pi$). Зарисовать осциллограмму этого напряжения при $I_y = 1$ мА.

Так как генератор G1 обеспечивает напряжение только одной полярности (полусинусоида), то картины на осциллографе каждые полпериода совпадают с кривыми, изображенными на рис. 11.4, a, в диапазоне $0\dots\pi$.

11.4. Обработка результатов

1. По данным, полученным методом характеристографа, построить семейство ВАХ тиристора при токах управляющего электрода 1, 2, 3 мА, а также ВАХ тиристора в открытом состоянии при $I_y = 5$ мА.

2. По данным табл. 11.2 построить на одном графике зависимости напряжения включения от тока управления для температур 20 и 50 °С.

3. По осциллограммам тока, протекающего через R_T , при разных токах управляющего электрода рассчитать среднюю мощность, выделяемую в нагрузочном резисторе R_T :

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{t} \int_0^t R_T I^2 dt,$$

где I – ток в нагрузке; t – время, за которое производится усреднение (период следования импульсов – π). Если рассчитывать среднюю мощность в относительных единицах к максимальной, которая может выделиться в нагрузке при полностью открытом тиристоре (при $I_y = 5$ мА), то

$$P_{\text{ср}} / P_{\text{ср max}} = \int I^2 dt / \int I_m^2 dt,$$

где $I_m(t)$ – зависимость тока от времени при полностью открытом тиристоре (при $I_y = 5$ мА). Интегрирование можно выполнить численным методом, например, методом прямоугольников по формуле

$$\int_0^t I^2 dt = \frac{t}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2,$$

где $I_i = I(t)$, n – число частей разбиения интервала интегрирования (рис. 11.6).

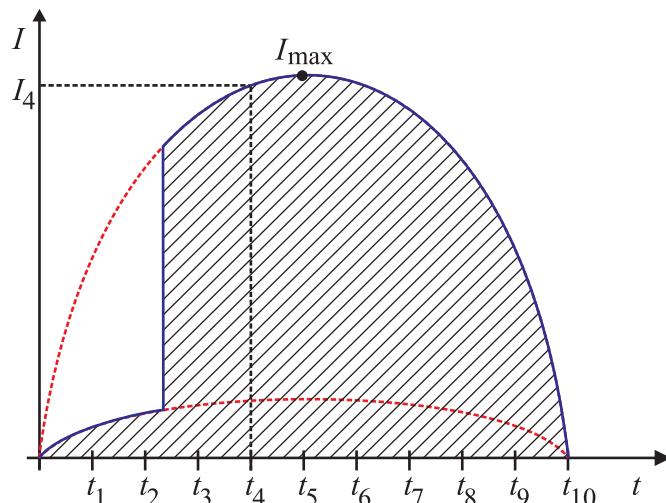


Рис. 11.6. К расчету средней мощности, выделяющейся в нагрузочном резисторе

Расчет удобнее выполнять в виде табл. 11.3, разбив период на десять частей ($n = 10$) и измерив на экспериментальных осциллограммах значения I_i в произвольных единицах.

Таблица 11.3

I_y , мА	i	I_i , произвольные единицы	I_i^2	$\sum I_i^2$	$P_{\text{ср}} / P_{\text{ср max}}$
5	1				
	2				

	...				
3					
1					
0					

По данным табл. 11.3 построить график $P_{\text{ср}}/P_{\text{ср max}} = f(I_y)$.

4. Рассчитать максимальную мощность, которой может управлять тиристор, если максимально допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора $U_{\text{пр. зкр max}} = 150$ В, а максимально допустимый ток в открытом состоянии $I_{\text{откр max}} = 10$ А.

11.5. Контрольные вопросы

1. Почему через тиристор в прямом направлении при напряжении на нем, меньшем напряжения включения, и в обратном направлении протекает малый ток?
2. Какие физические процессы приводят к включению и к выключению тиристора?
3. Назовите способы включения и выключения тиристоров.
4. Почему увеличение тока управляющего электрода приводит к снижению напряжения включения тиристора?
5. Как и почему температура влияет на параметры и ВАХ тиристора?
6. Как регулируется мощность с помощью тиристорного ключа?

Лабораторная работа 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

12.1. Основные понятия и определения

Туннельный диод (ТД) – это полупроводниковый диод с p - n -переходом, изготовленным на основе вырожденного полупроводника, в котором при прямом напряжении туннельный эффект приводит к появлению на ВАХ участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС).

Сильное легирование p - и n -областей при изготовлении туннельного диода ($N_{A,D} = 10^{19} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$) создает очень малую протяженность области объемного заряда (около 10^{-2} мкм), в результате чего возникает возможность туннельного прохождения электронов через потенциальный барьер. Следствием сильного легирования является вырождение p - и n -областей. Уровень Ферми в этом случае расположен в разрешенных зонах.

На рис. 12.1 показаны энергетические диаграммы p - n -перехода на основе вырожденных полупроводников при различных приложенных извне напряжениях. При нулевом напряжении (рис. 12.1, *а*) уровень Ферми постоянен по координате. Электроны из зоны проводимости n -области могут туннелировать на свободные уровни в валентной зоне p -области и обратно. Встречные потоки электронов равны, и суммарный ток, протекающий через диод, равен нулю.

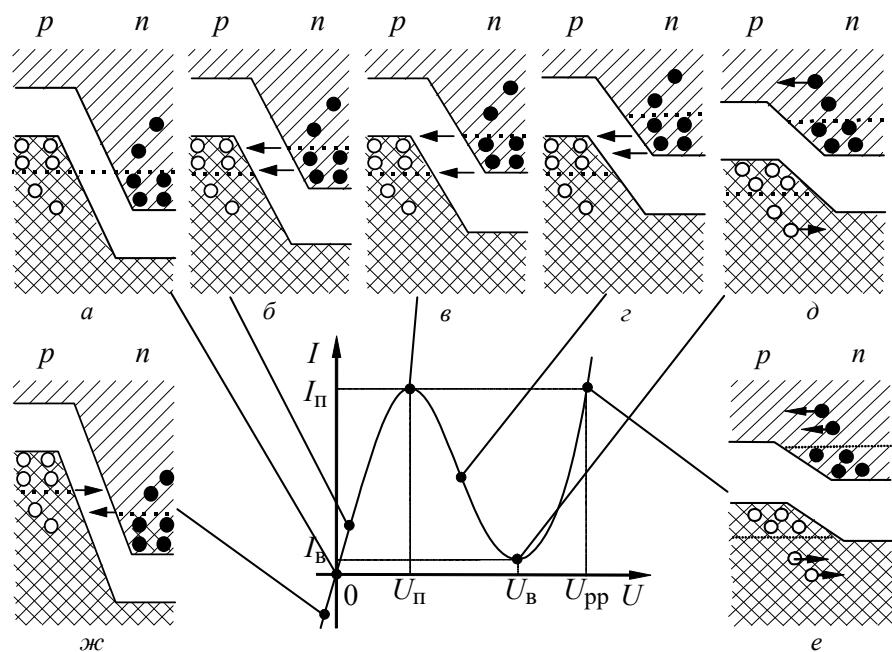


Рис.12.1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода и энергетические диаграммы, поясняющие ток на ее отдельных участках.

При небольшом прямом напряжении уменьшается высота потенциального барьера, т. е. энергетические уровни в n -области смещаются

вверх относительно энергетических уровней в *p*-области. При этом заполненные электронами уровни зоны проводимости оказываются напротив свободных разрешенных уровней валентной зоны *p*-области и вероятность туннельных переходов электронов из *n*-области в *p*-область возрастает (рис. 12.1, *б*). Это приводит к появлению прямого туннельного тока, который возрастает с увеличением прямого напряжения и достигает максимума (ток пика – $I_{\text{п}}$) при наибольшем перекрытии уровней, заполненных электронами в зоне проводимости *n*-области и свободных уровней валентной зоны *p*-области (рис. 12.1, *в*).

При дальнейшем увеличении прямого напряжения взаимоперекрытие этих областей разрешенных зон уменьшается (рис. 12.1, *г*) и, соответственно, постепенно уменьшается туннельный ток – практически до нуля (рис. 12.1, *д*). Но при этом с подъемом прямого напряжения увеличивается обычный прямой ток, протекающий через *p-n*-переход (диффузионный, рекомбинационный), что иллюстрирует рис. 12.1, *е*.

В результате на прямой ветви ВАХ возникает пик туннельного тока $I_{\text{п}}$ при напряжении $U_{\text{п}}$ и остаточный ток, именуемый током впадины $I_{\text{в}}$, при напряжении $U_{\text{в}}$. Между двумя экстремальными токами расположен участок отрицательного дифференциального сопротивления, имеющий большое значение на практике. Вся прямая ветвь ВАХ ТД имеет *N*-образный вид.

При подаче обратного напряжения на ТД увеличивается потенциальный барьер и возрастает взаимоперекрытие свободных разрешенных уровней зоны проводимости *n*-области и занятых электронами уровней валентной зоны *p*-области (рис. 12.1, *ж*). Таким образом, обратный ток обусловлен туннелированием электронов, но теперь уже из валентной зоны *p*-области в зону проводимости *n*-области. ТД в отличие от выпрямительного диода имеет довольно высокую проводимость при обратном напряжении.

Основными параметрами, характеризующими статическую ВАХ туннельного диода, являются (см. рис. 12.1): пиковый ток $I_{\text{п}}$; ток впадины $I_{\text{в}}$; отношение токов $I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$; напряжение пика $U_{\text{п}}$; напряжение впадины $U_{\text{в}}$; напряжение раствора U_{pp} – напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому; модуль отрицательного дифференциального сопротивления $|r_-| \approx (U_{\text{в}} - U_{\text{п}})/(I_{\text{п}} - I_{\text{в}})$.

Заметим также, что времена туннелирования носителей через область объемного заряда *p⁺-n⁺*-перехода чрезвычайно малы ($10^{-12} \dots 10^{-13}$ с), а накопления неосновных носителей в базе ТД практически нет. Следствием

этого является чрезвычайно высокое быстродействие ТД. Рабочие частоты могут составлять сотни гигагерц, что соответствует миллиметровому диапазону радиоволн. Усилители на ТД обладают очень малыми собственными шумами, поэтому им отдают предпочтение при создании входных цепей радиоприемных систем. Также важным является их использование в сверхбыстродействующих логических элементах.

12.2. Описание установок для проведения исследований

12.2.1. Схема для исследования вольт-амперной характеристики ТД

Основная трудность при исследовании ВАХ на падающем участке (участок отрицательного дифференциального сопротивления) состоит в том, что наличие реактивностей (индуктивность самого ТД, его корпуса, выводов в сочетании с последовательно включенным элементом, дающим эффект ОДС) создает условия неустойчивости, приводящие к возникновению сверхвысокочастотных СВЧ колебаний тока и напряжения. Для их подавления обычно производят шунтирование ТД низкоомным резистором, чтобы результирующее дифференциальное сопротивление оказалось положительным при любом подаваемом на диод напряжении. При этом для построения ВАХ вычисляется реальный ток через диод.

В данной работе для большей наглядности использован другой прием подавления СВЧ-колебаний: удалены выводы ТД, а сам диод подсоединен непосредственно к обкладкам конденсатора (без выводов), что шунтирует ТД на СВЧ и тем самым препятствует возникновению колебаний напряжения.

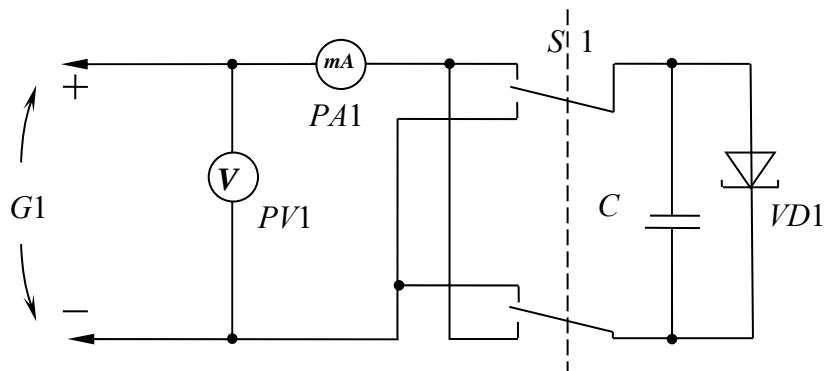


Рис. 12.2. Схема для исследования ВАХ туннельного диода

В этом случае исследование ВАХ может быть выполнено простым классическим методом вольтметра – амперметра (рис. 12.2). Схема содержит источник напряжения G_1 . Смена полярности (переключение напряжения, подавляемого на ТД, с прямого на обратное) производится переключателем S_1 . Напряжение и ток измеряются с помощью стрелочных вольтметра и

миллиамперметра $PV1$ и $PA1$. Исследуемый ТД (ЗИ-101А) изготовлен на основе GaAs.

12.2.2. Схема для изучения эффекта дискретно-аналоговой памяти

Как было отмечено, туннельный диод имеет N -образную ВАХ. Если через ТД пропустить ток I_0 , значение которого менее тока пика $I_{\text{п}}$, но больше тока впадины $I_{\text{в}}$, то возникает трехзначность значения напряжения на ТД, соответствующего этому току (рис. 12.3). Однако устойчивыми значениями на практике оказываются те, которые равны U_1 и U_2 , т. е. напряжениям на участках с положительным дифференциальным сопротивлением. Таким образом, при постоянстве тока, протекающего через ТД, на нем могут оставаться два устойчивых потенциальных состояния U_1 и U_2 .

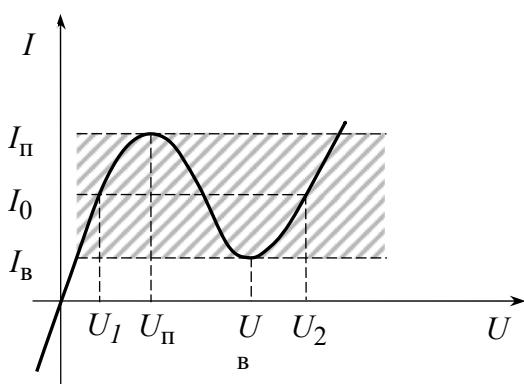


Рис.12.3. Область токов через ТД, в которой проявляется бистабильность остаточных напряжений

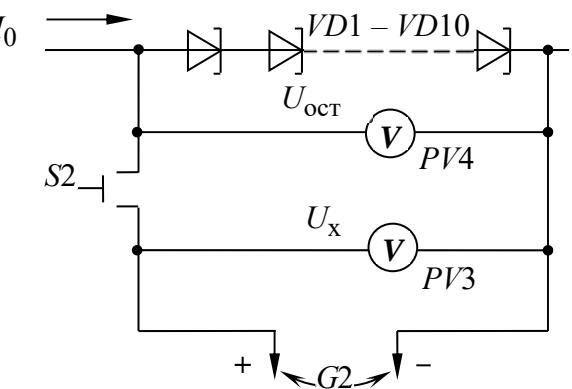


Рис. 12.4. Схема для изучения эффекта дискретно-аналоговой памяти

Если составить последовательную цепь из нескольких ТД и пропустить через нее ток I_0 , то каждый из диодов в цепи может иметь относительно малое напряжение U_1 или большое U_2 . Возникает эффект многоустойчивости значений напряжения в такой цепи. Число дискретных потенциальных состояний m соответствует выражению

$$m = n + 1,$$

где n — число ТД в цепи. При этом каждое из остаточных напряжений $U_{\text{ост}}$, за исключением минимального и максимального (все ТД в состоянии с U_1 или U_2), могут реализоваться множеством конкретных потенциальных состояний ТД в цепи.

В установке используется цепь из 10 ТД (рис. 12.4). Источник сигнального напряжения $G2$ может быть кратковременно с помощью кнопочного выключателя $S2$ подключен к этой цепи. Остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$ после отключения сигнального U_x оказывается близким к сигнальному.

Сигнальное и остаточное напряжения измеряются стрелочными вольтметрами $PV3$ и $PV4$, находящимися на пульте установки. ВАХ и эффект памяти исследуются на одной установке. Схемы, приведенные на рис. 12.2 и 12.4, воспроизведены на пульте установки.

12.2.3. Схема для исследования эффектов усиления и генерации электрических сигналов

Эффект усиления проявляется в активном делителе напряжения, состоящем из последовательно включенных туннельного диода и нагрузочного сопротивления R_H (рис. 12.5, *а*). Принципиальным здесь является выбор оптимального значения R_H , обеспечивающего значительно большее изменение напряжения на ТД и R_H по сравнению с изменением полного напряжения, подаваемого на эту цепь.

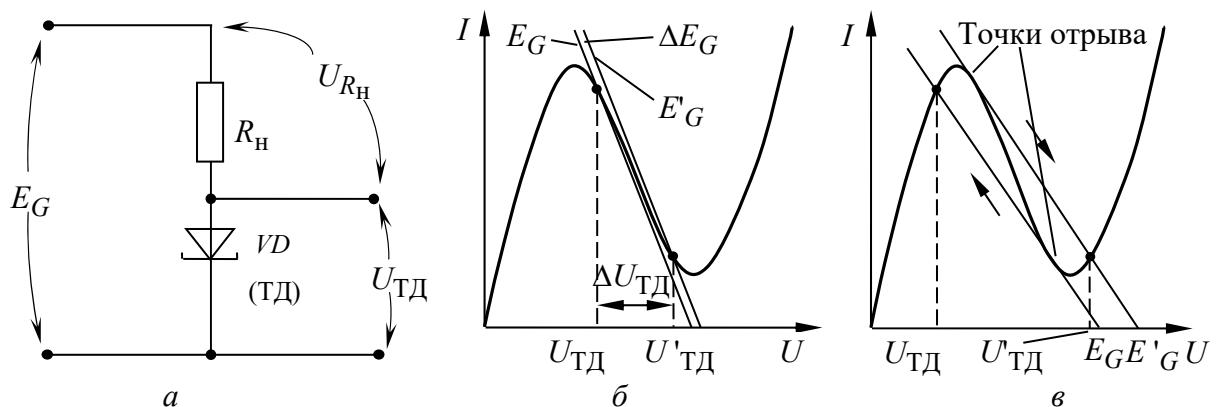


Рис.12.5. Активный делитель напряжения "резистор – ТД": *а* – схема; нагрузочные характеристики: *б* – иллюстрирующая эффект усиления по напряжению; *в* – иллюстрирующая эффект переключения

Этот эффект легко может быть проиллюстрирован графическим построением *нагрузочной характеристики* делителя напряжения (рис. 12.5, *б*). Полное напряжение E_G , подаваемое на цепь из ТД и R_H , есть сумма падений напряжения на туннельном диоде $U_{TД}$ и сопротивлении нагрузки U_{R_H} . Если отложить ВАХ туннельного диода от нулевого напряжения, а ВАХ нагрузочного резистора – от полного подаваемого напряжения E_G , причем в обратную сторону при одинаковом масштабе тока (см. рис. 12.5, *б*), то точка пересечения двух ВАХ будет означать одинаковый ток в обоих элементах и, соответственно, разделять падения напряжения на ТД и R_H .

Усилительный эффект проявляется, если наклон нагрузочной характеристики (ВАХ R_H) очень близок к наклону спадающего участка ВАХ туннельного диода, но при этом она имеет лишь одну точку пересечения с ВАХ туннельного диода. Иными словами, R_H должно быть близким к модулю

отрицательного дифференциального сопротивления ТД в окрестности рабочей точки $|r_-|$, но не превышать его:

$$R_H \leq |r_-|.$$

В этом случае очень малое смещение нагрузочной характеристики при изменении входного напряжения на величину ΔE_G (см. рис. 12.5, б) вызывает значительное перемещение точки пересечения двух ВАХ и, следовательно, довольно большое изменение напряжений на ТД (ΔU_{TD}) и на R_H (ΔU_{RH}). Отметим при этом, что усилительные ТД, в отличие от переключательных, имеют линейность спада участка ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Коэффициент усиления по напряжению K_U равен отношению приращений выходного напряжения ΔU_{TD} и входного ΔE_G :

$$K_U = \Delta U_{TD} / \Delta E_G.$$

Заметим также, что если сопротивление R_H превысит модуль ОДС туннельного диода $|r_-|$, то изменения входного напряжения будут вызывать отрывы точки пересечения двух ВАХ и, соответственно, скачки напряжения (тока) в цепи. Возникает режим переключения (см. рис. 12.5, в).

Если в качестве нагрузки использовать не резистор (как в усилителе), а индуктивность, то получается генератор переменного напряжения u_{\sim} .

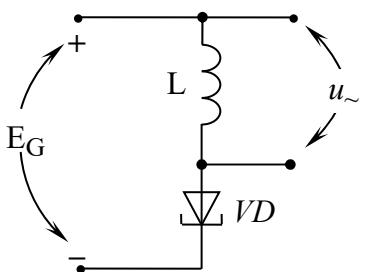


Рис.12.6. Генератор переменного напряжения на туннельном диоде

В цепи из последовательно включенных индуктивности и туннельного диода (рис.12.6) при подаче внешнего напряжения E_G , соответствующего участку отрицательного дифференциального сопротивления, возникает эффект внутренней положительной обратной связи. Его суть заключается в том, что малая флуктуация напряжения на ТД вызывает изменение тока, протекающего через ТД и

индуктивность. Изменение тока вызывает появление ЭДС самоиндукции, которую, в свою очередь, изменит напряжение на ТД – в ту же сторону, в которую произошла флуктуация. Эта самоподдержка вызывает потерю устойчивости тока и напряжения в цепи, что возбуждает их периодические осцилляции. Предельный размах колебаний тока определяет достижение токов I_{π} и I_b , а частоту колебаний, в основном, определяет скорость изменения тока, протекающего через индуктивность, и достижение им предельных значений.

Эффекты усиления и генерирования электрических сигналов исследуются на отдельной установке, схема которой приведена на рис. 12.7. Напряжение от источника, включаемого в сеть ключом S_1 , подается на активный делитель напряжения из ТД и нагрузочных резистора R_H или индуктивности L . Нагрузочные элементы переключаются ключом S_2 .

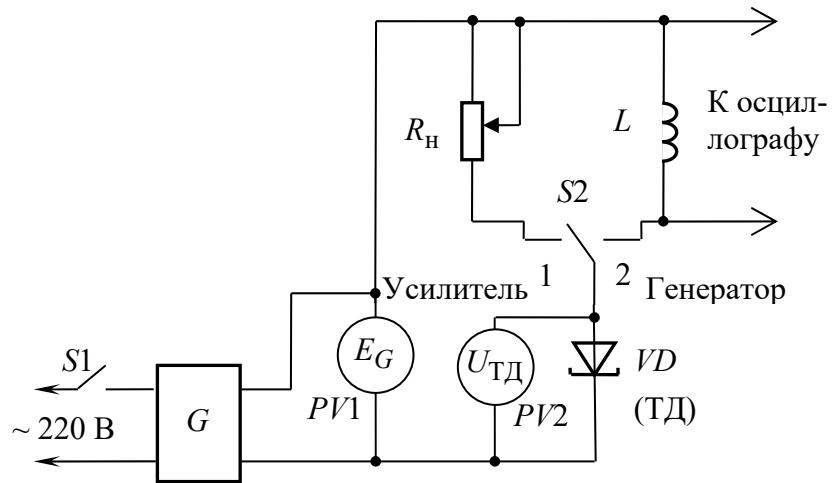


Рис.12.7. Схема установки для исследования усиления и генерации электрических сигналов

При работе усилителя входное (E_G) и выходное ($\Delta U_{\text{TД}}$) напряжения измеряются стрелочными приборами $PV1$ и $PV2$. Регулируется входное напряжение E_G с помощью двух ручек управления, расположенных на пульте управления установки: грубо (верхняя ручка) и более точно (нижняя ручка). Значение сопротивления R_H регулируется переменным резистором, причем значения R_H обозначены градуировкой у ручки-указателя. Там же красной меткой обозначено значение R_H , близкое к критическому, переводящему схему из режима усиления в режим переключения. Генерируемый сигнал в виде осциллирующего напряжения в случае индуктивной нагрузки (переключатель S_2 в положении 2) выведен на клеммы, с которых он может наблюдаться на осциллографе.

12.3. Порядок проведения исследований

12.3.1. Исследование вольт-амперной характеристики

Включить сетевое питание первой (левой) установки. Перевести переключатель "ВАХ-ПАМ" в положение "ВАХ". Напряжение регулируется ручкой управления $G1$. Переключатель полярности установить в положение "Прямое". Плавно повышать прямое напряжение на ТД в пределах от 0 до 1,2 В. Зафиксировать токи, протекающие через ТД, при 10–12 значениях напряжения, особо отметив при этом токи пика $I_{\text{п}}$ и впадины $I_{\text{в}}$, а также

напряжение раствора U_{pp} . Далее переключить ключ $S1$ в положение "Обратное". Изменять обратный ток от 0 до 2 мА и зафиксировать напряжения для 4 значений обратного тока.

12.3.2. Исследование функции дискретно-аналоговой памяти

Перевести ключ "ВАХ-ПАМ" в положение "ПАМ". Функция памяти может быть охарактеризована снятием зависимости остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ от значений подаваемого на цепь из ТД сигнального напряжения U_x . Напряжение U_x устанавливают с помощью регулятора $G2$ и фиксируют левым стрелочным прибором. Кратковременное приложение напряжения U_x к цепи производится нажатием кнопки $S2$. После нажатия кнопки и ее отжатия остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$ фиксируется правым стрелочным прибором.

Изменять U_x следует в пределах от 0 до 10 В с шагом приращения примерно 0,5 В. Следует убедиться в том, что остаточное напряжение при этом имеет дискретные приращения $\Delta U_{\text{ост}}$. Это можно сделать, подавая очень малые приращения U_x на небольшом любом участке полной характеристики $U_{\text{ост}}(U_x)$.

12.3.3. Изучение эффекта усиления

Включить сетевое питание правой установки ключом $S1$. Ключ $S2$ установить в положение 1. Снять передаточную зависимость выходного напряжения $U_{\text{ТД}}$ от полного подаваемого на делитель напряжения E_G при трех значениях нагрузочного сопротивления R_H , указанных в табл. 12.1. Значение 100 Ом – докритическое, 130 Ом – предкритическое (красная метка), при нем будет отмечаться область значительных приращений $U_{\text{ТД}}$ при очень малых приращениях E_G .

Снятие передаточной характеристики следует выполнять с шагом приращения E_G , приблизительно равным 0,1 В, однако в области резкого возрастания выходного напряжения следует этот шаг уменьшить, пользуясь дополнительным регулятором E_G . При закритическом значении $R_H = 160$ Ом следует особо отметить напряжения срыва на передаточной характеристике при повышении и снижении выходного напряжения E_G .

Таблица 12.1.

E_G , В	Выходное напряжение $U_{\text{ТД}}$ при разных значениях R_H , В		
	100 Ом	R_H , крит ~ 130 Ом	160 Ом

При R_H , близком к критическому, в режиме усиления коэффициент усиления настолько возрастает, что на значение U_{R_H} могут влиять колебания питающего сетевого напряжения и, соответственно, напряжения E_G , что может затруднить измерение U_{TD} .

12.3.4. Изучение эффекта генерации

Включить в качестве нагрузочного элемента индуктивность L , пользуясь переключателем $S2$. Установить по вольтметру питающее напряжение E_G , соответствующее примерно середине участка ОДС на ВАХ туннельного диода ($\sim 0,6$ В). Наблюдать осцилляции напряжения с помощью осциллографа С1-83. Для этого необходимо включить питание осциллографа, перевести осциллограф в режим временной развертки (использовать канал I), нажав кнопку "Г"; установить скорость развертки 1 с/дел., а синхронизацию сделать внутренней с I канала. Чувствительность входа сигнала для I канала установить 10 мВ/дел $\times 10$. Плавно изменяя частоту развертки и уровень синхронизации, получить устойчивый вид осциллограммы колебаний напряжения. Изменяя значение питающего напряжения E_G , добиться максимальной амплитуды осцилляций, отметить это напряжение и зарисовать осциллограмму. Зафиксировать масштаб усиления по вертикали (чувствительность входа I) на осциллограмме. Изменяя значение напряжения E_G , найти пределы, в которых сохраняется режим осцилляций при плавном увеличении и снижении напряжения (E_{Gmin}, E_{Gmax}).

12.4. Обработка результатов

1. По данным, полученным в 12.3.1, построить ВАХ туннельного диода. Обозначить токи I_{Π} и I_B и соответствующие им значения напряжений U_{Π} и U_B . Отметить напряжение раствора U_{pp} . Вычислить кратность изменения тока I_{Π}/I_B на участке ОДС и значение модуля отрицательного дифференциального сопротивления $|r_-|$ на середине участка спада тока по формуле

$$|r_-| = \Delta U_{TD} / \Delta I,$$

где ΔU_{TD} и ΔI – приращения напряжения и тока соответственно ($\Delta I \sim 0,1$ мА).

2. Построить зависимость остаточного напряжения на цепи из 10 ТД от действовавшего сигнального U_x . Отметить дискрет изменения $U_{ост}$ и диапазон изменения U_x , в пределах которого сохраняется эффект дискретно-аналоговой памяти. Сравнить дискрет приращения $\Delta U_{ост}$ со значением разницы двух устойчивых падений напряжения при пропускании тока I_0 ,

соответствующего середине участка ОДС на построенной вольт-амперной характеристике ТД (см. рис. 12.3).

3. По данным табл. 12.1 построить семейство передаточных характеристик активного делителя напряжения, т. е. зависимости выходного напряжения $U_{\text{ТД}}$ от входного E_G для трех значений нагрузочного сопротивления R_{H} . По приращениям напряжения $\Delta U_{\text{ТД}}$ и ΔE_G на середине участка резкого подъема передаточной характеристики, полученной при $R_{\text{H}} \leq R_{\text{H, кр}}$, вычислить коэффициент усиления по напряжению K_U по формуле

$$K_U = \Delta U_{\text{ТД}} / \Delta E_G.$$

4. Приложить к отчету осциллограмму колебаний напряжения на ТД. Отметить на осциллограмме значение напряжения E_G , при котором амплитуда оказалась максимальной. Используя масштаб усиления по вертикали I канала, найти амплитуду осцилляций напряжения. Отметить на ВАХ туннельного диода минимальное и максимальное питающие напряжения ($E_{G\min}$ и $E_{G\max}$), при которых сохраняются осцилляции напряжения.

12.5. Контрольные вопросы

1. Объясните ход ВАХ туннельного диода.
2. Какие параметры ТД можно определить по статической ВАХ?
3. В чем состоит основная трудность снятия статической ВАХ туннельного диода?
4. В чем состоит принцип реализации дискретно-аналоговой памяти на туннельных диодах?
5. Как объяснить усиление по напряжению в активном делителе напряжения, составленного из туннельного диода и резистора, и каково должно быть значение нагрузочного сопротивления в этой цепи, обеспечивающее высокий коэффициент усиления?
6. Объясните причину возникновения осцилляций напряжения (тока) в последовательной цепи из ТД и индуктивности.