

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

---

И. А. Ламкин   С. А. Тарасов   А. Н. Пихтин

## ОСНОВЫ ФОТОНИКИ

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2020

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

---

И. А. Ламкин   С. А. Тарасов   А. Н. Пихтин

## ОСНОВЫ ФОТОНИКИ

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2020

УДК 621.38: 535.14 (07)

ББК 3 86

Л21

**Ламкин И.А., Тарасов С. А., Пихтин А. Н.**

Л21 Основы фотоники: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 62 с.

ISBN

Содержит описание цикла из четырех работ, включающих изучение работы основных современных приборов фотоники (светодиоды, полупроводниковый лазер, фотодиоды), изучение цветовых характеристик различных излучателей.

Предназначено для подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 – «Электроника и микроэлектроника».

УДК 621.38: 535.14 (07)

ББК 3 86

Рецензенты: д. ф.-м. н., проф. ИФНИТ СПбГПУ Петра Великого Н. Т. Сударь, к. ф.-м. н., с. н. с. ФТИ им. А.Ф. Иоффе С.О. Слипченко.

Утверждено

редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

ISBN

©СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ RGB-СВЕТОДИОДА

Целью работы является исследование характеристик и определение основных параметров полупроводниковых светодиодов.

#### 1.1. Основные сведения о полупроводниковых светодиодах

Светодиоды – полупроводниковые источники некогерентного оптического излучения, принцип действия которых основан на явлении электролюминесценции при инжекции неосновных носителей заряда через гомо- или гетеро- $p-n$ -переход. Приборы, излучающие в видимом диапазоне, принято называть светоизлучающими диодами – СИД. Чаще всего они используются как индикаторы для отображения информации, а также как малоинерционные источники света для генерации световых импульсов малой длительности. Также выделяют инфракрасные (ИК) и ультрафиолетовые (УФ) светодиоды. Особым классом светодиодов являются «белые» СИД, чье излучение охватывает практически весь видимый диапазон спектра. Белые светодиоды активно замещают лампы накаливания и ртутные флуоресцентные лампы в осветительных приборах благодаря высокой эффективности и значительно большему сроку службы. Также существуют многоцветные светоизлучающие диоды, в частности, RGB-светодиоды. RGB — это аббревиатура, которая обозначает три основных цвета излучения, испускаемых таким СИД: R (Red) — красный, G (Green) — зеленый и B (Blue) — синий. Таким образом, внутри подобных приборов одновременно размещается три типа светодиодных кристаллов, испускающих излучение с различной длиной волны.

В основе действия полупроводниковых светодиодов лежит электролюминесценция. *Люминесценция* – это излучение, избыточное над тепловым при данной температуре и обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. *Электролюминесценция* – это люминесценция, возбуждаемая внешним электрическим полем. Наиболее эффективным методом электрического возбуждения является инжекция неосновных носителей заряда через  $p-n$ -переход при приложении к нему прямого напряжения  $U$ . Такая люминесценция называется *инжекционной*.

Энергетическая диаграмма  $p-n$ -перехода показана на рис. 1.1. Рассмотрим распределение носителей заряда по энергиям в  $n$ -области структуры при отсутствии внешнего напряжения (сечение А-А на рис. 1.1, а). Видно, что

концентрация электронов в области сечения велика, а количество дырок очень мало. При смещении  $p$ – $n$ -перехода в прямом направлении потенциальный барьер снижается на  $eU$  (рис. 1.1, б), электроны из  $n$ -области инжектируются в  $p$ -область, а дырки – в  $n$ -область. За счет процессов рекомбинации концентрация неосновных носителей заряда убывает по экспоненциальному закону по мере их диффузии от области объемного заряда. Глубиной проникновения инжектированных носителей считают расстояние, на котором их концентрация уменьшится в  $e$  раз, т. е. диффузионную длину  $L_n$  в  $p$ -материале и  $L_p$  в  $n$ -материале.

Неравновесное распределение носителей заряда, возникающее в  $n$ - и  $p$ -областях за счет инжекции неосновных носителей через  $p$ - $n$ -переход, может быть охарактеризовано с помощью квазиуровней Ферми. Это означает, что уровень Ферми будет расщепляться на два квазиуровня отдельно для электронов  $F_n^*$  и дырок  $F_p^*$  как показано на рис. 1.1, б. По мере удаления от области объемного заряда квазиуровни Ферми будут приближаться к равновесному уровню, сливаясь с ним. На расстоянии, равном диффузионной длине  $L_n$  или  $L_p$ , неравновесный квазиуровень Ферми снижается (для электронов) или повышается (для дырок) приблизительно на  $kT$  от максимального значения на границе  $p$ – $n$ -перехода.

Интенсивность инжекции неосновных носителей заряда через  $p$ – $n$ -переход определяется величиной прямого напряжения  $U$ , приложенного к структуре. Максимальная величина напряжения  $U_{\max}$  в этом случае определяется полным спрямлением потенциального барьера, поскольку потенциальный барьер можно почти полностью «убрать» внешним полем, но невозможно сделать его отрицательным. Тогда, как видно из данных рис. 1.1,  $eU_{\max} \approx E_g$  и типичные значения рабочего напряжения  $U_{\text{раб}} \approx 1 \dots 4$  В. При этом необходимо учитывать, что при протекании тока часть напряжения падает в базовых областях и на контактах. Типичные значения рабочего тока светодиодов составляют 0,1...300 мА. Они зависят от площади  $p$ – $n$ -перехода и ограничены нагревом. Однако вклад в люминесценцию дает только излучательная рекомбинация, при которой избыточная энергия рекомбинирующих частиц выделяется в виде кванта электромагнитного излучения – фотона. Безызлучательная рекомбинация, приводящая к рождению фононов (разогре-

ву кристаллической решетки), нежелательна и снижает эффективность работы светодиода.

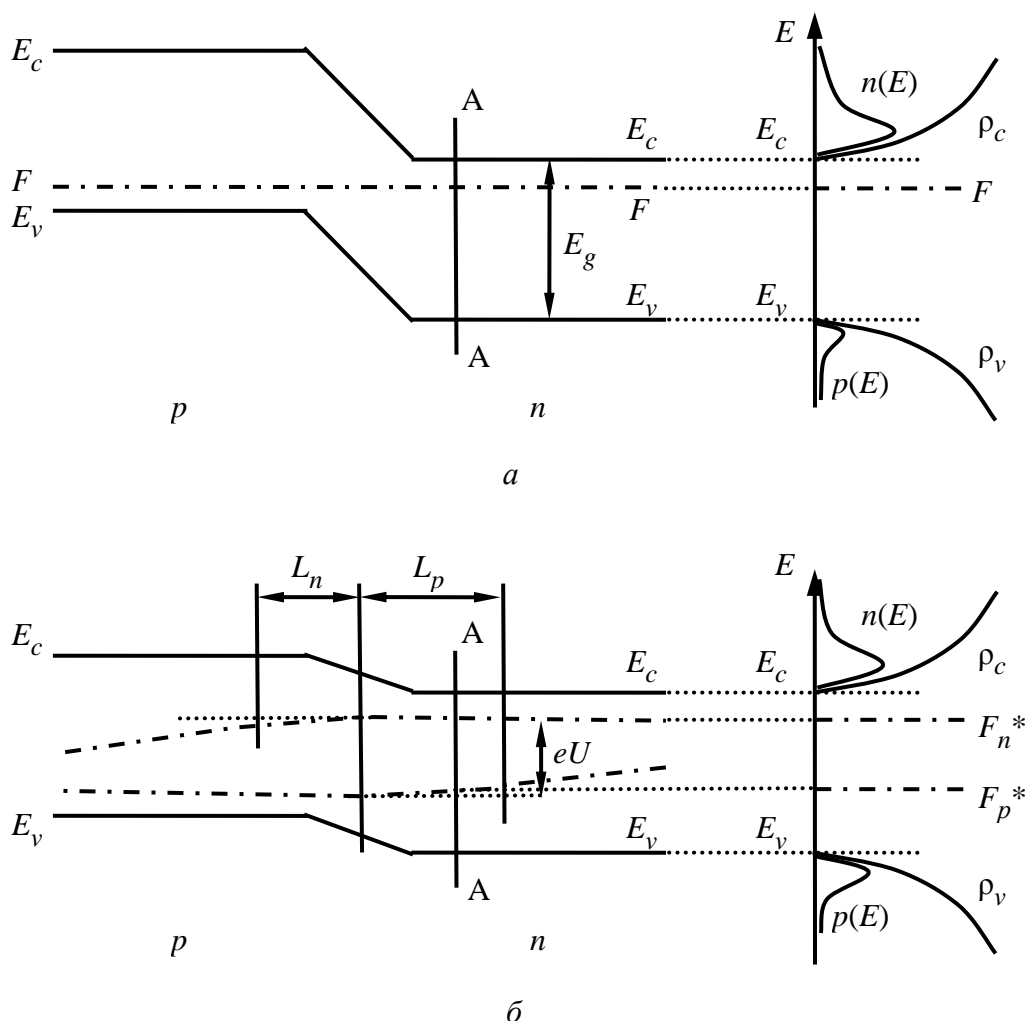


Рис. 1.1. Энергетические диаграммы и распределение носителей заряда по энергиям (сечение А-А) для  $p$ - $n$ -перехода: а – при отсутствии внешнего напряжения; б – при приложении напряжения  $U$  в прямом направлении

Полное число излучательных переходов в единицу времени в единице объема пропорционально произведению концентрации свободных электронов  $n$  и дырок  $p$ :

$$\Phi = Bnp, \quad (1.1)$$

где постоянная  $B$  определяется скоростью рекомбинации  $R_0$  и собственной концентрацией носителей заряда в полупроводнике  $n_i$  в соответствии с соотношением:

$$B = \frac{R_0}{n_i^2}. \quad (1.2)$$

Скорость рекомбинации связана с показателем поглощения  $k_\omega$  соотношением Ван-Русбрека–Шокли:

$$R_0(\omega) = \frac{\omega^2 n^2}{\pi^2 c^2} \frac{k_\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}. \quad (1.3)$$

Для прямых разрешенных межзонных переходов коэффициент (показатель) поглощения пропорционален корню из энергии:

$$k_\omega \sim (\hbar\omega - E_g)^{1/2}. \quad (1.4)$$

Подставив выражения (1.2)–(1.4) в (1.1), получаем спектр собственной люминесценции для переходов зона–зона:

$$\Phi_\omega \approx \Phi_0 \left( \frac{\hbar\omega - E_g}{E_g} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{\hbar\omega - E_g}{kT} \right). \quad (1.5)$$

Из (1.5) видно, что максимум спектра люминесценции соответствует энергии  $\hbar\omega = E_g + kT/2$ , а ширина спектра пропорциональна  $kT$ . Таким образом, основным параметром, определяющим диапазон излучения светодиода, является ширина запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника или полупроводникового твердого раствора.

К наиболее распространенным светодиодам относятся СИД на основе арсенида галлия. Прямая структура энергетических зон GaAs позволяет создать прибор с высокой эффективностью преобразования электрической энергии в излучение. Кроме того, из всех прямозонных полупроводников GaAs является наиболее технологически освоенным. Светоизлучающие диоды на основе арсенида галлия работают в ближней инфракрасной области спектра. Важно, что спектр излучения GaAs-светодиодов очень хорошо соответствует спектру фоточувствительности Si-фотодиодов.

Понятно, что изменить местоположение максимума спектральной характеристики СИД на основе бинарных соединений ( $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$  и др.) практически невозможно, поскольку ширина запрещенной зоны полупроводника постоянна при неизменной температуре. Поэтому в полупроводниковой оптоэлектронике в основном используют твердые растворы этих соединений. Важнейшим преимуществом таких растворов является возможность плавно

и в широких пределах регулировать основные характеристики твердого раствора путем изменения его состава при минимальном рассогласовании параметров решетки.

Светодиоды для области более 1 мкм изготавливаются на основе прямозонных твердых растворов  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ . Для них преобладающей является квазимежзонная излучательная рекомбинация. Важно, что максимум спектра излучения таких светодиодов задается составом твердого раствора. Изменяя  $x$  и  $y$ , можно изготовить светодиод для заданной области спектра, например, совпадающей с минимумом потерь в оптическом волокне или с максимумом спектра поглощения какого-либо вещества, концентрацию которого предстоит контролировать.

Светодиоды для области спектра  $\lambda > 5$  мкм могут быть изготовлены на основе халькогенидов свинца:  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ ,  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$  и ртути:  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ .

Светоизлучающие диоды для красной области спектра изготавливают из прямозонных твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ,  $x < 0,4$  (используются квазимежзонные переходы), а также из непрямозонного GaP, легированного (Zn + O), где используется излучательная рекомбинация экситонов, связанных на изоэлектронном комплексе (Zn – O).

Первые светодиоды, излучающие в оранжевой, желтой и зеленой областях спектра, создавались на основе непрямозонного твердого раствора  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  ( $x > 0,6$ ), легированного азотом. Азот в этом материале является эффективной изоэлектронной ловушкой и существенно повышает вероятность излучательной рекомбинации. В светодиодах на основе GaP:N кроме основной полосы с максимумом  $\lambda = 0,565$  мкм в зеленой области спектра как правило присутствует дополнительная красная полоса  $\lambda_{\text{max}} = 0,7$  мкм, обусловленная остаточным кислородом в активном эпитаксиальном слое диода. В последние годы благодаря успехам технологии широкое распространение получили высокоэффективные красные и желтые светодиоды на основе четырехкомпонентного твердого раствора с прямой структурой энергетических зон  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{P}$ .

Светоизлучающие диоды коротковолновой области видимого спектра, работающие в голубом, синем и фиолетовом диапазонах, могут быть созданы на основе нитрида галлия GaN и гетеропереходов с использованием твердых растворов  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$  и  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ .



В белых светодиодах используется коротковолновый GaN-Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>N-светодиод с нанесенным на его поверхность специальным люминофором, осуществляющим преобразование синего излучения в желто-зеленое. В качестве люминофора используются некоторые диэлектрики, в частности алюмоиттриевые гранаты, активированные редкоземельными ионами. Белое излучение создается в результате суммирования излучения светодиода и люминофора.

В светодиодах на основе гомопереходов вывод излучения осложняется большим самопоглощением, поскольку  $\hbar\omega \approx E_g$ . Значительные преимущества дает использование при создании СИД структур с гетеропереходами, а также двойных гетероструктур.

*Гомопереход* образуется в полупроводнике за счет искусственно созданного распределения примесей. *Гетеропереход* представляет собой контакт (переход) на атомном уровне двух различных по химическому составу материалов (полупроводников), осуществленный в одном кристалле. В зависимости от скорости изменения основных параметров по координате различают резкие и плавные гетеропереходы. В *резком* гетеропереходе это изменение происходит на уровне одного или двух-трех молекулярных слоев. В *плавном* гетеропереходе контактная область простирается на десятки, а иногда и сотни периодов решетки (молекулярных слоев).

Гетеропереход называется *изотипным*, если он образован полупроводниками с одинаковым типом электропроводности, и *анизотипным*, если образующие его материалы обладают разными типами электропроводности. При обозначении гетероперехода принято указывать тип проводимости полупроводника с узкой запрещенной зоной строчными буквами *n* или *p*, а полупроводника с широкой запрещенной зоной – прописными буквами *N* или *P*. На первом месте обычно указывают тип электропроводности более узкозонного материала; так, изотипные гетеропереходы обозначают *n-N* или *p-P*, а анизотипные гетеропереходы – *n-P* или *p-n*.

В области контакта двух различных по химическому составу материалов происходит не только изменение ширины запрещенной зоны, но и других электрофизических характеристик материала, в том числе диэлектрической проницаемости, электронного сродства, геометрических параметров решетки, эффективной массы носителей заряда и их подвижности. На границе раздела возможно появление различных дефектов, что является нежелательным. Гете-

ропереход, в котором на границе раздела двух материалов отсутствуют поверхностные состояния, называется *идеальным*. Наиболее сильное влияние на отклонение свойств гетероперехода от идеального оказывает различие в параметрах решеток и в температурных коэффициентах линейного расширения материалов, образующих гетеропереход. По этой причине относительное значение разности параметров решеток двух контактирующих материалов

$$\frac{\Delta a}{\bar{a}} = \frac{2}{a_1 + a_2} (a_1 - a_2)$$

обычно не должно превышать 0,1 %. Дополнительным условием является совпадение их кристаллохимической природы.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют трех- и четырехкомпонентные твердые растворы в группе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ : GaAs–AlAs ( $Al_xGa_{1-x}As$ ), GaSb–AlSb ( $Al_xGa_{1-x}Sb$ ), GaP–AlP ( $Al_xGa_{1-x}P$ ), Ga–In–As–P ( $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ ).

В отличие от идеального, в реальном гетеропереходе на границе раздела всегда присутствуют поверхностные состояния. Важно, чтобы их влияние на свойства  $p$ – $n$ -перехода было малым. В трехкомпонентных твердых растворах изменение состава приводит одновременно к изменению как периода идентичности решетки, так и ширины запрещенной зоны. В четырехкомпонентных твердых растворах типа  $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$  изменением  $x$  и  $y$  можно в некоторых пределах независимо изменять параметры решетки и ширину запрещенной зоны. При определенных соотношениях между  $x$  и  $y$  можно подобрать такой ряд растворов, в котором ширина запрещенной зоны будет изменяться при неизменном периоде идентичности решетки. Такой ряд твердых растворов называют *изопериодным*. Гетеропереходы, изготовленные на основе изопериодных твердых растворов, по своим характеристикам наиболее близки к идеальным.

Энергетические зонные диаграммы  $p$ – $n$ - и  $n$ – $P$ -гетеропереходов представлены на рис. 1.2. Вследствие скачка диэлектрической проницаемости и электронного сродства контактирующих материалов в резких гетеропереходах появляются разрывы в валентной зоне ( $\Delta E_v$ ) и в зоне проводимости ( $\Delta E_c$ ), соотношение между которыми различно для разных материалов.

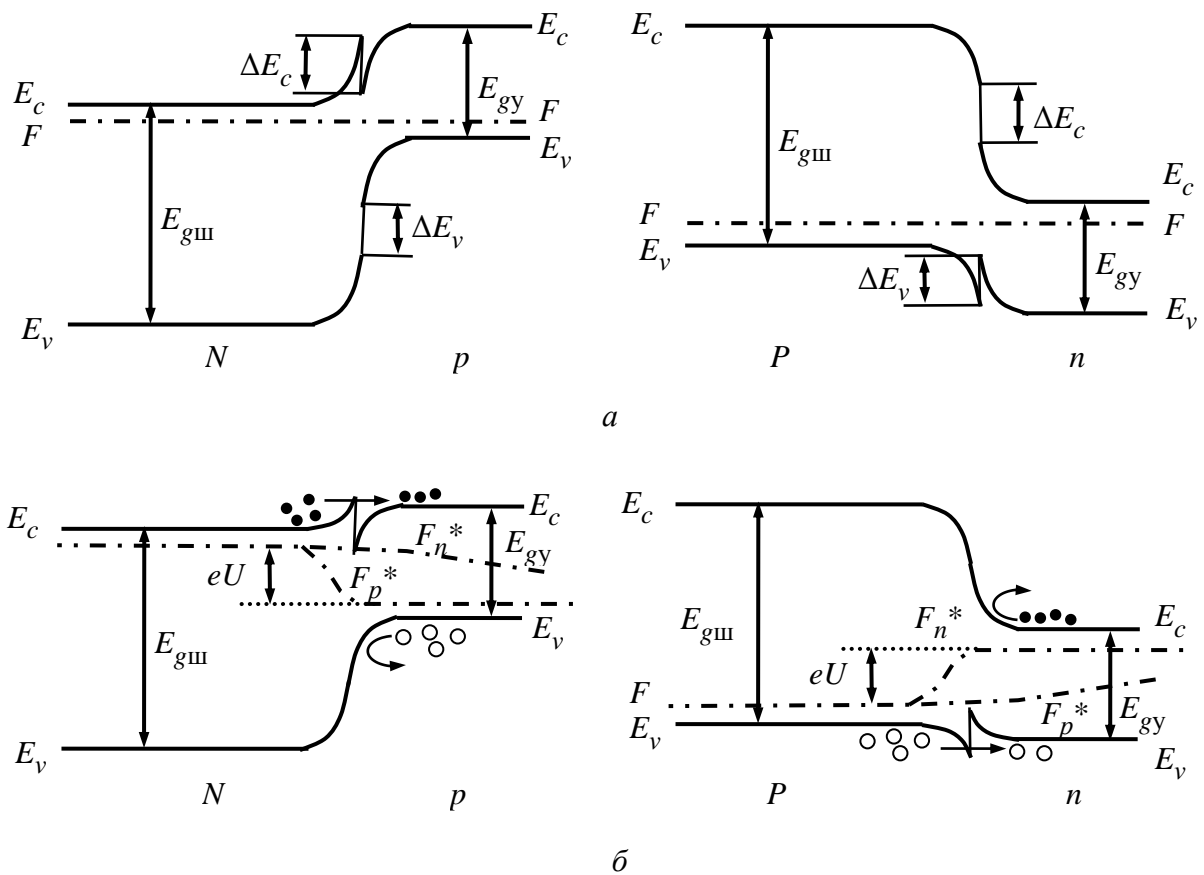


Рис. 1.2. Энергетические диаграммы  $N$ - $p$ - и  $P$ - $n$ -гетеропереходов:  
 а – в условиях теплового равновесия; б – при смещении в прямом направлении

Важнейшей характеристикой светодиодов является *эффективность*  $\eta$  преобразования электрической энергии в световую. Эффективность светодиода представляет собой его КПД и связана с внешним квантовым выходом электролюминесценции  $\eta_e$  соотношением:

$$\eta \approx \frac{\hbar\omega_{\max}}{eU_{\text{раб}}} \eta_e, \quad (1.6)$$

где  $\hbar\omega_{\max}$  – энергия фотона, соответствующая максимуму спектра излучения;  $U_{\text{раб}}$  – приложенное внешнее напряжение. Одним из основных факторов, определяющих эффективность СИД, является структура диода и тип перехода, используемый в ней. Применение гетероструктур позволяет увеличить  $\eta$  светодиода в несколько раз.

Значение внешнего квантового выхода  $\eta_e$  будет определяться внутренним квантовым выходом люминесценции  $\eta_i$ , коэффициентом инжекции  $\eta_I$  и оптической эффективностью вывода света  $\eta_o$ :

$$\eta_e = \eta_i \eta_I \eta_o. \quad (1.7)$$

Проанализируем вклад в общую эффективность каждого из входящих в (1.7) сомножителей.

Внутренний квантовый выход люминесценции  $\eta_i$  определяется соотношением вероятностей излучательной  $\tau_{изл}$  и безызлучательной  $\tau_{би}$  рекомбинаций:

$$\eta_i = \frac{1/\tau_{изл}}{1/\tau} = \frac{\tau}{\tau_{изл}} = \frac{\tau_{би}}{\tau_{би} + \tau_{изл}}. \quad (1.8)$$

Он зависит от особенностей зонной структуры полупроводника, типа легирующих примесей и их концентрации, а также от степени совершенства материала. Важно, чтобы скорость излучательной рекомбинации превышала скорость безызлучательной. По этой причине для изготовления светодиодов предпочтительнее использовать полупроводники с прямой структурой энергетических зон, поскольку вероятности излучательных переходов там существенно выше, чем в непрямозонных материалах.

Как правило, излучательная рекомбинация преобладает в одной из областей ( $p$ - или  $n$ -), прилегающих к  $p$ - $n$ -переходу. Поэтому  $p$ - $n$ -переход в светодиоде должен обеспечить преимущественную инжекцию неосновных носителей заряда в ту область, где  $\eta_i$  максимален. Если активной областью с высоким  $\eta_i$  является  $p$ -область материала, тогда коэффициент инжекции  $\eta_I$  есть отношение электронного тока  $I_e$  к полному току  $I$ , протекающему через  $p$ - $n$ -переход в прямом направлении:

$$\eta_I = \frac{I_e}{I} = \frac{I_e}{I_e + I_p}. \quad (1.9)$$

Наилучшие условия для односторонней инжекции обеспечиваются в гетеропереходе, где осуществляется преимущественная инжекция из широкозонной области в узкозонную.

Коэффициент вывода света  $\eta_o$  определяется процессами распространения света в активном материале, его отражением и поглощением на границах раздела, в том числе процессами полного внутреннего отражения. Вели-

чина  $\eta_o$  представляет собой оптическую эффективность вывода из кристалла излучения, генерируемого в активной области светодиода. Из-за большого значения показателя преломления  $n$  полупроводника из диода может выйти только малая часть света, падающего на верхнюю грань в пределах конуса с критическим углом:

$$\theta_{кр} = \arcsin \frac{1}{n}. \quad (1.10)$$

Если пренебречь поглощением внутри диода, то доля излучения, которое может быть выведено из светодиода с плоской геометрией через его верхнюю грань при первом падении на нее световой волны, составляет:

$$\eta_o = \frac{\sin^2 \theta_{кр}}{4} T \approx \frac{1}{n(n+1)^2}, \quad (1.11)$$

где  $T$  – коэффициент пропускания света.

Коэффициент вывода света  $\eta_o$  можно повысить, увеличивая критический угол  $\theta_{кр}$  и уменьшая отражение в пределах выходного конуса. Для этого над кристаллом светоизлучающего диода размещают линзу, имеющую полусферическую, усеченную сферическую или эллипсоидальную геометрию. Использование линзы позволяет увеличить телесный угол  $\theta_{кр}$ , что приводит к возрастанию значения  $\eta_o$  почти на порядок. Меняя форму линзы, можно также регулировать диаграмму направленности светодиода.

Современные светодиоды выполняются на основе ДГС. Для повышения эффективности оптического вывода используются различные методы, в частности интерференционные зеркала. На рис. 1.3, *a* показана светодиодная структура, выращенная на низкоомной (высоколегированной)  $n^+$ -подложке. Такая подложка требуется для обеспечения минимальных омических потерь, хорошего растекания тока и качественного теплоотвода. К сожалению, высокое легирование приводит к возрастанию влияния эффектов самопоглощения. Кроме того, в ряде случаев ширина запрещенной зоны подложки может быть меньше энергии излучаемых фотонов, т. е. материал будет непрозрачен для излучения светодиода. Для ограничения проникновения фотонов в подложку можно использовать интерференционные зеркала, называемые также распределенными брэгговскими отражателями (РБО). Для создания РБО выращиваются чередующиеся слои полупроводниковых соединений, удовлетворяющие условию  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$ . Интерференция, возникающая при

многократном отражении от границ слоев, приводит к максимуму отражения и минимуму пропускания для излучения с длиной волны  $\lambda$ . Важно, что РБО отражает фотоны, но не препятствует движению носителей заряда через подложку. Это позволяет наносить отрицательный электрод на нижнюю поверхность кристалла.

Излучающая часть СИД представляет собой ДГС, активная область которой может содержать квантоворазмерные структуры. Вывод излучения осуществляется через широкозонный  $P$ -эмиттер и второй брегговский отражатель, выполняющий функцию просветляющего покрытия и удовлетворяющий условию интерференции на максимум пропускания (минимум отражения):  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/2$ . Для обеспечения хорошего омического контакта перед напылением металла на структуру наносят высоколегированный  $p^+$ -слой. Для снижения поглощения света в верхнем электрическом контакте, имеющем кольцевую форму, боковые области полупроводника подвергают ионной бомбардировке для придания им свойств полуизолятора и вытеснения тока в центральную часть кристалла. Вместо бомбардировки можно также использовать контакты специальной формы – в виде креста, точки и т. п.

Поскольку нитридные СИД в настоящее время выращиваются на чужеродных подложках, часто обладающих диэлектрическими свойствами, то наносить отрицательный контакт на обратную часть структуры в них нельзя. Контакты в таких светодиодах приходится делать с одной стороны, но на разных уровнях (рис. 1.3, б). На подложке сапфира или карбида кремния после буферного слоя выращивается толстый слой  $n^+$ -GaN, к которому будет присоединен катод, затем ДГС с активной областью, содержащей множественные квантовые ямы, и слой  $p$ -GaN для положительного контакта. Для получения доступа к  $n^+$ -области вытравливается мезоструктура, после чего наносится отрицательный контакт. Поскольку сапфировые подложки характеризуются низкой теплопроводностью, то для улучшения теплоотвода светодиодные структуры часто устанавливают в «перевернутом» виде –  $p$ -областью вниз (flip-chip). Излучение в этом случае выводится через подложку, прозрачную для коротковолнового света.

Как следует из (1.5), спектр излучения СИД определяются тремя основными факторами: коэффициентом  $\Phi_0$ , шириной запрещенной зоны  $E_g$  и температурой  $T$ . Рассмотрим влияние этих факторов более подробно.

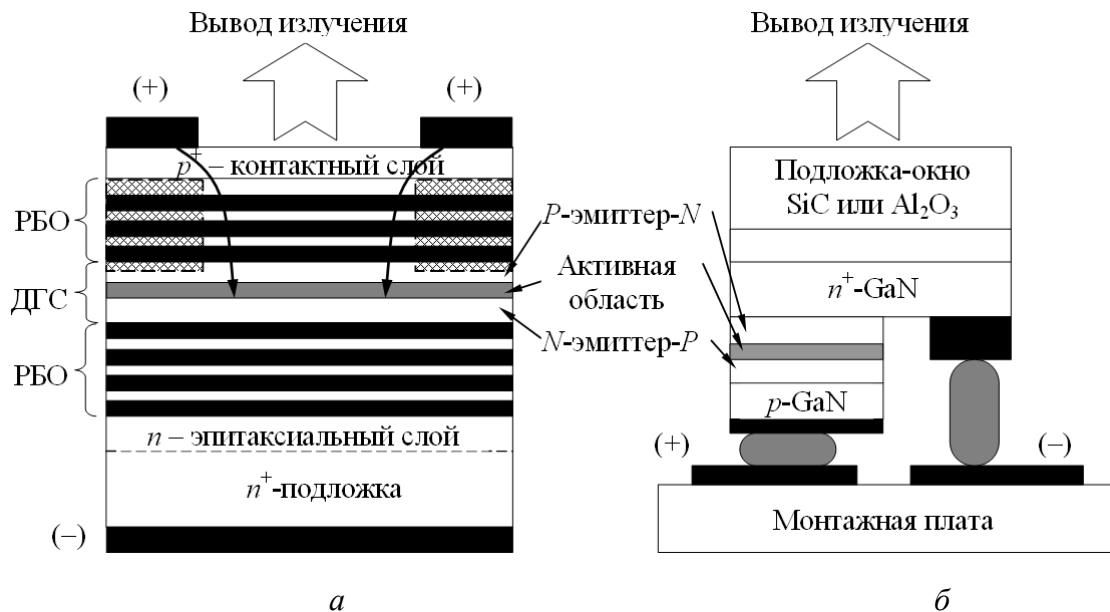


Рис. 1.3. Структуры светодиодов: *а* – с интерференционными зеркалами (распределенными брегговскими отражателями; *б* – flip-chip на основе полупроводниковых нитридов

Коэффициент  $\Phi_0$  по существу определяет мощность излучения светодиода в максимуме спектральной характеристики. Мощность излучения зависит от числа рекомбинационных переходов с испусканием фотона, которое в свою очередь определяется вероятностью таких переходов, внутренней квантовой эффективностью и числом носителей заряда в активной области (АО). Концентрация электронов зависит от интенсивности инжекции в структуре, т. е. от прямого тока  $I_{пр}$ .

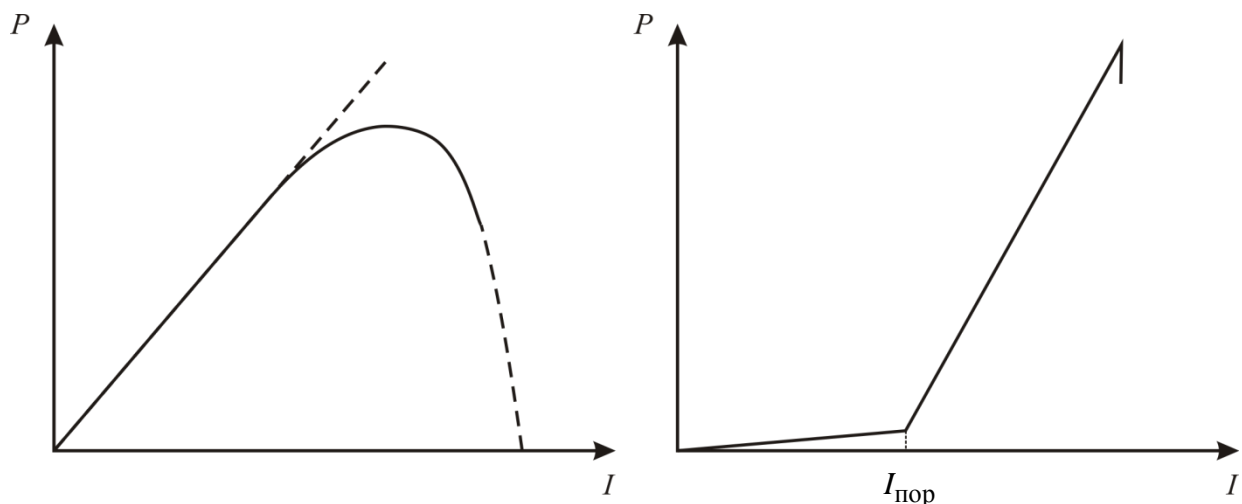


Рис. 1.4. Ватт-амперная характеристика: *а* – светодиода; *б* – лазерного диода

Таким образом, изменение коэффициента  $\Phi_0$  соответствует ватт-амперной характеристике СИД (ВТАХ). Общий ход ВТАХ СИД и инжекционного по-

лупроводникового лазера (ИПЛ) представлен на рис. 1.4. При малых токах мощность излучения светодиода линейно увеличивается с ростом накачки. Отклонение от линейности обусловлено самонагревом кристалла, приводящего к увеличению доли безызлучательных переходов. Безызлучательная рекомбинация приводит к дополнительному нагреву кристалла, что при дальнейшем росте тока может приводить к явлению *температурного гашения люминесценции* и полному прекращению излучения, а в некоторых случаях и выходу СИД из строя.

В отличие от светодиодов ватт-амперная характеристика лазерного диода носит пороговый характер. До  $I < I_{\text{пор}}$  лазерный диод работает в светодиодном режиме и испускает ненаправленное спонтанное излучение. Низкий внешний квантовый выход в этом режиме обусловлен потерями на поглощение в пассивных областях и контактах, отражением при выходе излучения и полным внутренним отражением. При  $I > I_{\text{пор}}$  на рабочем участке ватт-амперной характеристики наблюдается резкое возрастание мощности через зеркала резонатора вследствие преобладания вынужденной рекомбинации носителей. При этом происходит уменьшение интенсивности спонтанного излучения, регистрируемого через боковую поверхность. Пропускание слишком высоких токов накачки приводит к выходу лазера из строя. Основными причинами является перегрев кристалла и разрушение зеркал резонатора.

Ширина запрещенной зоны  $E_g$  определяет местоположение спектра на оси энергий или длин волн. В идеальном СИД излучение начинается с энергий равных ширине запрещенной зоны, а максимум спектра лежит на расстоянии  $kT/2$  от  $E_g$ . В реальных СИД всегда присутствуют состояния, лежащие внутри запрещенной зоны (примеси и иные дефекты), поэтому излучение начинается при энергиях меньших  $E_g$ , а максимум спектра приблизительно соответствует ширине запрещенной зоны. Сильное влияние на спектр излучения СИД оказывает температурное изменение ширины запрещенной зоны материала, которое приводит к увеличению максимальной длины волны излучения при росте  $T$ . Разогрев может происходить не только при изменении температуры внешней среды, но и при пропускании прямого тока через структуру.

При использовании квантоворазмерных структур (КРС) при создании СИД длинноволновая граница излучения определяется не  $E_g$ , а минимальным расстоянием между уровнями размерного квантования. На изменение поло-



жения максимума спектральной характеристики при увеличении прямого тока в этом случае влияние оказывают не только самонагрев, но и квантоворазмерные эффекты, перераспределение носителей между уровнями и наличие хвостов плотностей состояний, в большинстве случаев приводящие к сдвигу максимума спектра в направлении противоположном температурному изменению ширины запрещенной зоны. Большинство коротковолновых СИД создаются на основе полупроводниковых нитридов с использованием КРС, поэтому при низких токах в таких структурах наблюдается коротковолновый сдвиг максимальной длины волны излучения.

Ширина спектра пропорциональна  $kT$ . Таким образом, при увеличении температуры происходит уширение спектральных характеристик излучения светодиодов.

## 1.2. Описание установки

Лабораторный стенд предназначен для исследования спектральных, температурных и ватт-амперных характеристик RGB-светодиода. Блок-схема установки изображена на рис. 1.5. Пунктирной линией обведены элементы, расположенные в едином корпусе лабораторного стенда, к которому подключается внешний блок питания для элемента Пельтье и спектрометр.

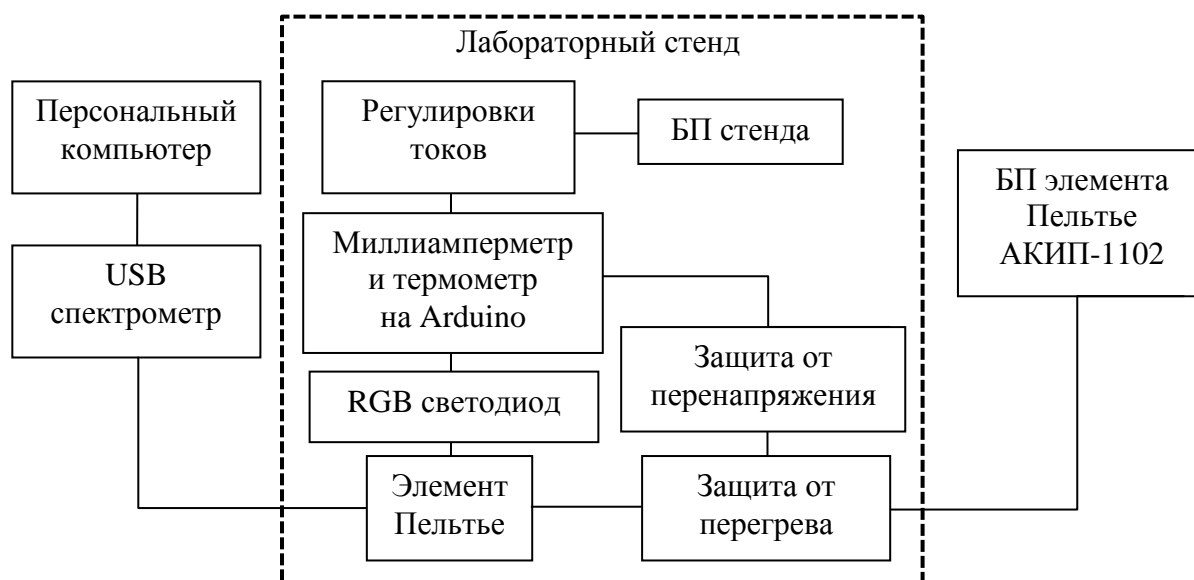


Рис. 1.5. Блок-схема установки для исследования характеристик RGB-светодиода

Лабораторный стенд позволяет регулировать ток отдельно на каждом кристалле светодиода от 0 до 30 мА, нагревать и охлаждать СИД в диапазоне

температур от 5 до 65 . На дисплее стенда в реальном времени отображается ток, протекающий через каждый кристалл светодиода, и температура СИД.

Излучение, испускаемое светодиодом, через оптоволокно передаётся в спектрометр быстрого сканирования, который измеряет спектр излучения менее чем за 0,1 секунды. Спектр излучения в реальном времени отображается на экране компьютера в программе SpectraSuite и может быть сохранён в виде текстового файла.

На рис. 1.6 изображена фотография лабораторного стенда.



Рис. 1.6. Фотография лабораторного стенда

На лицевой панели расположен дисплей LCD 1602, на котором отображаются значения температуры в градусах Цельсия и пропускаемых токов в миллиамперах. Снизу от дисплея расположены два индикаторных светодиода: красный сигнализирует о наличии перегрева, а зелёный – о перенапряжении на элементе Пельтье. В последнем случае индикация сопровождается звуковым сигналом. Трёхпозиционный переключатель в верхнем положении включает нагрев светодиода, в нижнем – охлаждение, в среднем (нейтральном положении) питание на элемент Пельтье не подаётся. В правой части панели находится по два переменных резистора и по выключателю для каждого кристалла светодиода. Цвет ручки соответствует цвету излучения, испускае-

тому кристаллом. Верхние резисторы предназначены для точной настройки тока, нижние – для грубой.

В боковой правой стенке стенда установлен специальный разъём для подключения оптоволокну. На задней стенке находится разъём для подключения стенда к сети 220 вольт и выключатель питания. Также в задней части стенда располагаются провода для подключения к внешнему блоку питания элемента Пельтье.

### 1.3. Порядок выполнения работы

При выполнении лабораторной работы необходимо оформить протокол исследований по следующему образцу:

Что изменялось	Имя файла «от»	Имя файла «до»
Разные токи синего СД при комнатной температуре	B1 T27.txt	B11 T27.txt

Выполнили:

гр. 0000

Ф.И.О.

Выполнение лабораторной работы необходимо осуществлять по следующему алгоритму:

1. Включить компьютер. Запустить программу SpectraSuite. Убедиться, что спектрометр обнаружился (появилось его изображение в левой панели 1, рис. 1.7), иначе вручную провести «рескан» приборов, для чего выбрать «Rescan Devices» в меню 2 «Spectrometer». Если спектрометр все равно не обнаружился, следует переключить USB-кабель в другой разъем и провести «рескан» заново.

2. Включить лабораторный стенд. Выключатель стенда находится на задней стенке. Кнопками «ВКЛ/ВЫКЛ СИД» включить все три кристалла светодиода и выкрутить ручки всех резисторов в крайнее правое положение. При этом через каждый кристалл будет протекать максимальный ток (30-35 мА).

3. Настроить диапазон измерения в программе SpectraSuite. Для этого установить усреднение просмотров 3 ед. в окне (10), максимальный ток каждого кристалла и, изменить время интеграции (11) таким образом, чтобы интенсивность спектров на экране была максимальной, но при этом не было пе-

реполнения (полочки в верхней части спектра, спектр должен быть «острым»). Значение времени интеграции должно составить примерно 7 мс.

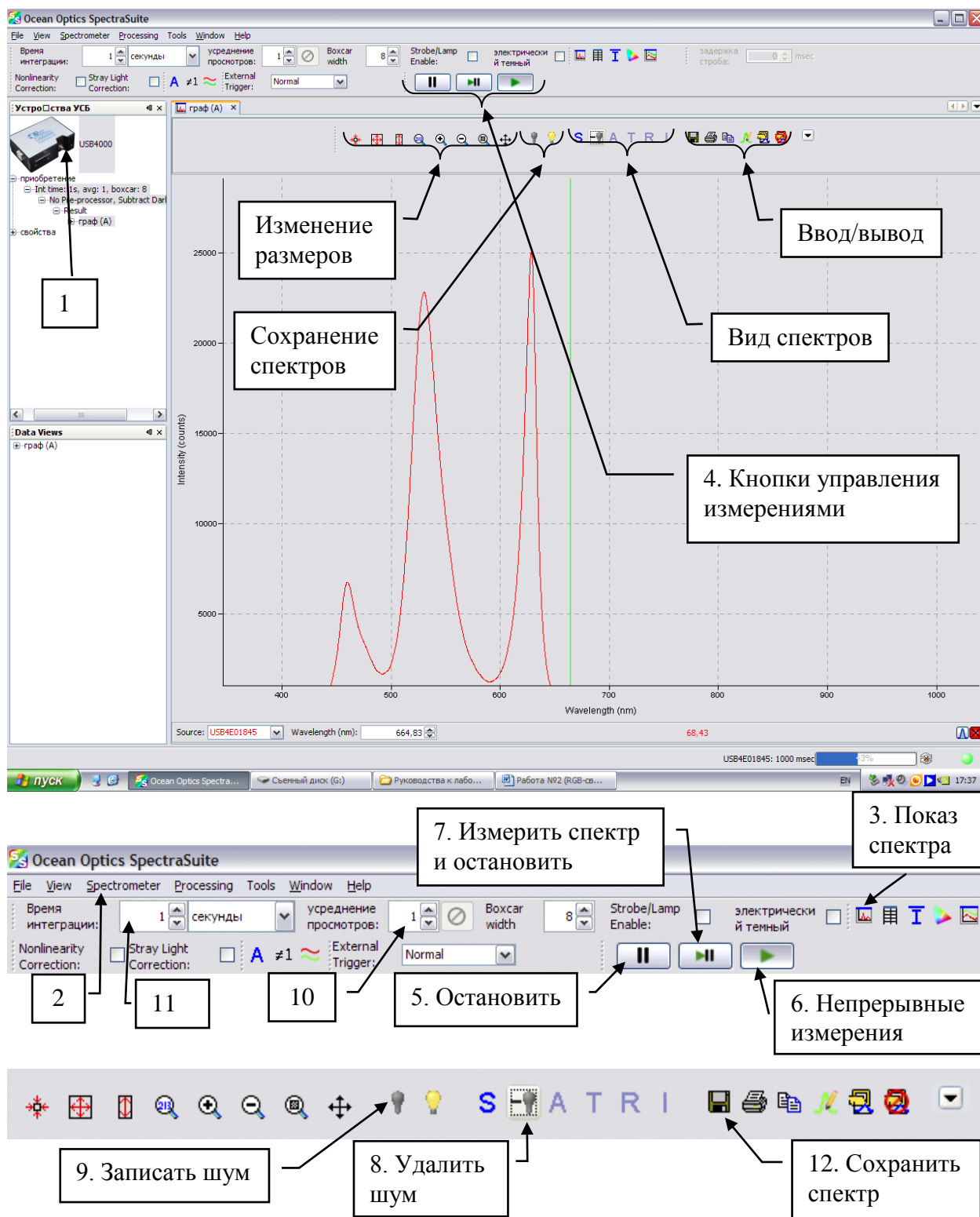


Рис. 1.7. Интерфейс программы SpectraSuite

4. Изменяя ток отдельно на каждом кристалле, визуально оценить изменение цвета излучения светодиода и формы его спектральной характеристики в программе SpectraSuite.

5. Убрать фоновый шум. *Шум («белый шум») обычно выглядит как относительно ровный спектр (с учетом помех) во всем измеряемом диапазоне длин волн.* Для этого выключить питание стенда, измерить один спектр и остановить измерения (7), затем записать шумовой спектр (9), удалить шум (8) и включить непрерывные измерения снова (6).

6. Сохранить измеренный спектр. Для этого нажать (12) и в новом окне в графе «File type» выбрать «Tab Delimited» (сохранение в виде текстового файла). Нажав кнопку «Browse», перейти в папку D:\Students, создать папку группы (если ее еще нет) и бригады (например, D:\Students\6202\6202-1\). Для удобства обработки данных в названии файлов следует указать значения всех токов (либо изменяемые токи) и температуры, например: «R10 G15 B20 T22.txt». Сохранить файл кнопкой «Save». После сохранения открыть записанный файл и убедиться, что он сохранён в формате «txt».

7. Включить питание стенда. Измерить и сохранить наборы спектров отдельно для каждого кристалла при токах от 5 до 30 мА через 5 мА. Во время измерений должен быть включен только один кристалл светодиода. Сохранение файлов можно осуществлять в режиме непрерывного измерения. При этом в оперативную память компьютера и в дальнейшем на жесткий диск записывается тот спектр, который отображается на экране в момент нажатия кнопки «Сохранить» (12) в программе SpectraSuite.

8. Включить все три кристалла (цвета) светодиода и регулировкой тока добиться белого цвета излучения. Сохранить спектр и записать значения токов. При дальнейших измерениях ток не изменять!

9. Перевести тумблер ОЛАЖДЕНИЕ/НАГРЕВ на лицевой панели стенда в положение «ВЫКЛ», включить блок питания элемента Пельтье, ручкой «НАПР» установить значение напряжения 8 В и подать его на элемент, нажав на блоке питания кнопку «ВЫХОД». Перевести тумблер ОЛАЖДЕНИЕ/НАГРЕВ в положение «ОХЛАЖДЕНИЕ». Ручкой «ТОК» увеличить ток до максимально возможного, охладить светодиод до минимально возможной температуры (около 0 °С) и записать спектр.

10. Измерить спектры в диапазоне от минимальной температуры до значения +65 °С через 15 °С. При достижении комнатной температуры тумблер ОЛАЖДЕНИЕ/НАГРЕВ следует переключить в положение «НАГРЕВ».

Интенсивность нагрева или охлаждения регулировать ручкой «ТОК» на блоке питания.

11. Выключить лабораторный стенд.

#### **1.4. Обработка результатов и содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие результаты.

1. Цель работы.
2. Блок-схема измерительной установки.
3. Спектральные характеристики каждого кристалла светодиода при различных значениях прямых токов. Спектры для каждого кристалла должны быть построены на одном графике. Для каждой из осей на графиках должны быть обязательно выбраны оптимальные диапазоны длин волн и интенсивностей соответственно. На всех графиках должны быть обозначены величины, откладываемые по осям, и приведены единицы их измерения.
4. Зависимость длин волн, соответствующих максимуму излучения каждого из кристаллов, от тока, протекающего через кристалл  $\lambda_{\max} = f(I_{np})$  в виде таблицы.
5. Ватт-амперные характеристики для каждого из кристаллов, т. е. зависимости мощности излучения (рассчитываемой как площадь под спектральной характеристикой) от тока, протекающего через кристалл  $P_{\max} = f(I_{np})$ .
6. Спектральные характеристики, соответствующие белому цвету излучения светодиода, при различных температурах.
7. Зависимость длин волн, соответствующих максимумам излучения каждого из кристаллов, от температуры светодиода в виде таблицы.
8. Выводы с подробным описанием каждой полученной характеристики.

#### **1.5. Контрольные вопросы**

1. Каковы физические основы работы светодиодов?
2. Что такое люминесценция и какие методы применяются для ее возбуждения?
3. Почему люминесценцию в полупроводниках часто называют рекомбинационной?
4. В чем основные отличия светодиодов от полупроводниковых инжекционных лазеров?

5. Какие факторы определяют спектр излучения светодиода?
6. Каким образом изменение температуры и силы тока, протекающего через светодиод, влияет на его спектральные характеристики?
7. Какие методы позволяют увеличить внутренний квантовый выход люминесценции  $\eta_i$ ?
8. Что влияет на величину коэффициента инжекции  $\eta_I$ ?
9. Пояснить необходимость применения линз в конструкции светоизлучающих диодов.
10. Назвать области применения светодиодов.
11. Пояснить отличие между ВТАХ СИД и ИПЛ.
12. Какие факторы определяют сдвиг максимума спектральной характеристики при увеличении прямого тока через структуру?
13. Пояснить различия в спектральных характеристиках светодиодных кристаллов с разным цветом излучения.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Целью работы является исследование цветовых характеристик излучателей.

#### **2.1. Основные сведения о цветовых характеристиках излучателей**

Цветовые характеристики являются важнейшими параметрами, определяющими свойства индикаторов, осветительных приборов и других излучателей видимого диапазона спектра. В первую очередь восприятие цветовых характеристик зависит от строения глаза человека. Внутренняя поверхность глазного яблока покрыта оболочкой, называемой сетчаткой, которая является светочувствительной частью глаза. На сетчатке есть ямка, представляющая собой центральную область сетчатки богатую колбочками, которая придает остроту зрению. Сетчатка состоит из стержневых и конических рецепторов – (палочек и колбочек), а также нервов, передающих информацию в мозг. Палочек намного больше, чем колбочек, и они обладают более высокой светочувствительностью. Палочки воспринимают излучение всего видимого спектра, а колбочки — только определенной его части. Существует три типа колбочек, воспринимающих излучение в красном, зеленом и голубом диапазо-

нах видимого спектра. Поэтому они и называются рецепторами красного, зеленого и голубого цвета или просто красными, зелеными и синими колбочками. В результате исследований была создана функция чувствительности человеческого глаза  $V(\lambda)$ , иногда называемая функцией световой эффективности. В 1924 г. Международная комиссия по освещению, МКО (CIE), ввела понятие функции чувствительности человеческого глаза, эта функция до сих пор является фотометрическим стандартом. В результате кривая видности глаза человека определила форму локуса цветовой диаграммы (рис. 2.1), которая является важнейшим графиком, используемым для определения цветности излучателей.

Монохроматические источники излучения ( $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ) располагаются по периметру цветовой диаграммы, а при увеличении ширины спектральной линии источника положение цвета на диаграмме смещается в сторону центра. Если ширина спектра излучения становится сравнимой с шириной всего видимого диапазона, излучатель считается источником белого света. Рабочая точка такого излучателя располагается вблизи центра цветовой диаграммы. Для человеческого глаза излучение светодиодов кажется монохроматическим, однако с точки зрения физики это не так, поскольку ширина спектральной линии светодиода является конечной величиной, приблизительно равной 1,8 нм. Поэтому рабочие точки светодиодов располагаются не на самой границе цветовой диаграммы, а вблизи нее. На рис. 2.1 показано расположение различных типов светодиодов на цветовой диаграмме. Светодиоды красного и синего свечения находятся на границе цветовой диаграммы. Чистота их цвета близка к 100 %. Однако светодиоды сине-зеленого и зеленого свечения смещены от периметра ближе к центру диаграммы, что объясняется большей шириной спектров излучения этой группы светодиодов и сильной кривизной цветовой диаграммы в зеленой области спектра.

Доминирующей длиной волны тестируемого источника света считается длина волны монохроматического излучения, расположенная на краю цветовой диаграммы на самом коротком расстоянии от точки с координатами цветности источника. Для определения доминирующей длины волны проводят прямую линию к краю диаграммы, проходящую через точку равной энергии источника белого света и точку с координатами цветности ( $x, y$ ), соответствующими тестируемому источнику света. Точка пересечения этой прямой с внешней границей цветовой диаграммы и будет определять доминирующую



длину волны источника. На рис. 2.2 схематично показана процедура нахождения доминирующей длины волны.

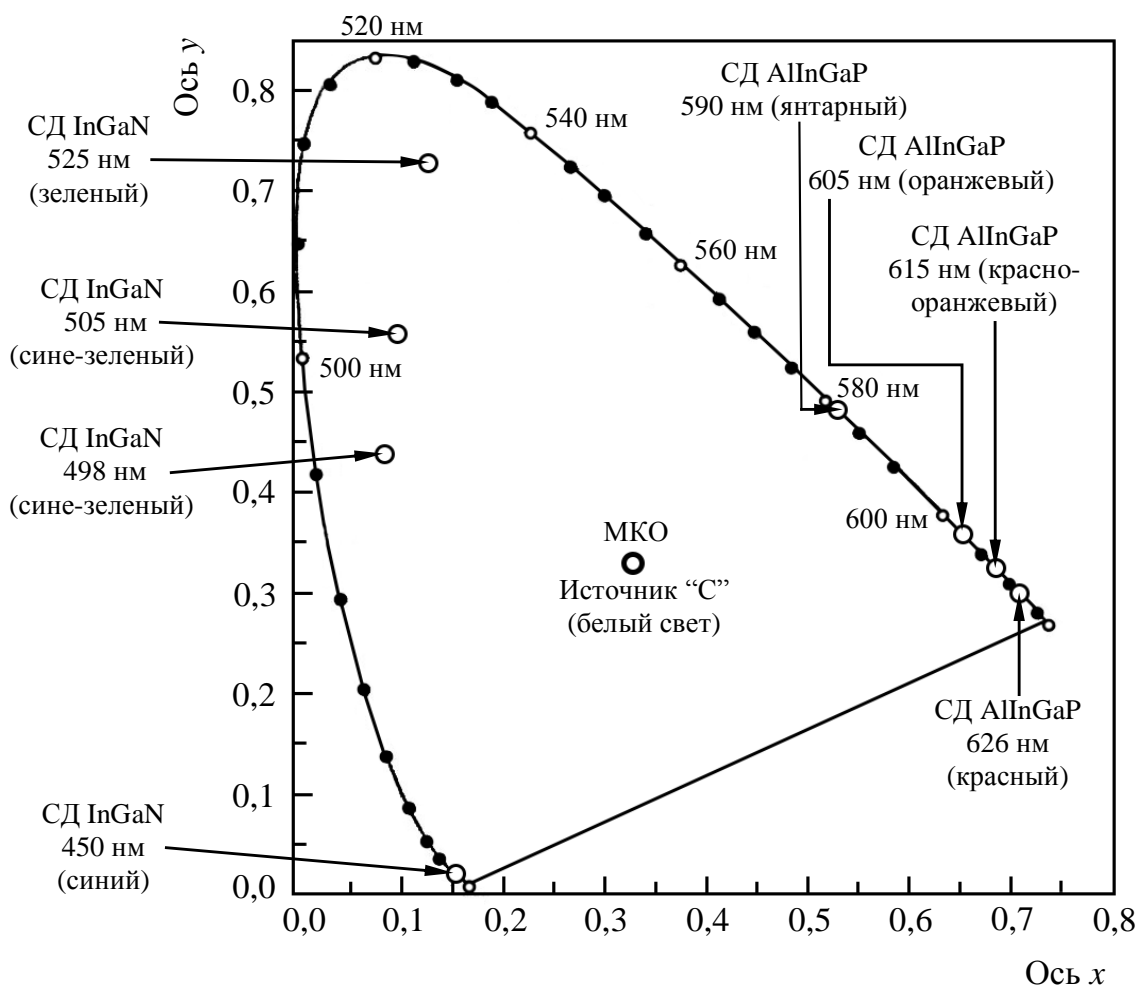


Рис. 2.1. Расположение различных типов светодиодов на цветовой диаграмме

В качестве эталонного источника белого цвета использовалось равномерно светящееся пятно с координатами  $(x = 1/3, y = 1/3)$ . Также показано расположение типичных светодиодов синего, зеленого и красного свечения. Чистота цвета или насыщенность цвета источника света равна расстоянию на цветовом графике между точкой с координатами цветности  $(x, y)$  и точкой равной энергии, деленному на расстояние между точкой доминирующей длины волны и точкой равной энергии. Для определения чистоты цвета используется выражение:

$$\text{Чистота цвета} = \frac{a}{a+b} = \frac{\overline{(x - x_{ee})^2 + (y - y_{ee})^2}}{\overline{(x_d - x_{ee})^2 + (y_d - y_{ee})^2}},$$

где  $a$  и  $b$  показаны на рис. 2.2, а  $(x, y)$ ,  $(x_{ee}, y_{ee})$ ,  $(x_d, y_d)$  соответствуют координатам цветности тестируемого источника света, эталонного источника

белого света и доминирующего цвета. Отсюда видно, что чистота цвета показывает насколько удален тестовый источник излучения от центра цветовой диаграммы. Для монохроматических источников ( $\Delta\lambda \rightarrow 0$ ), расположенных по периметру цветового графика, чистота цвета, как правило, равна 100 %, а для источников белого света она равна 0 %.

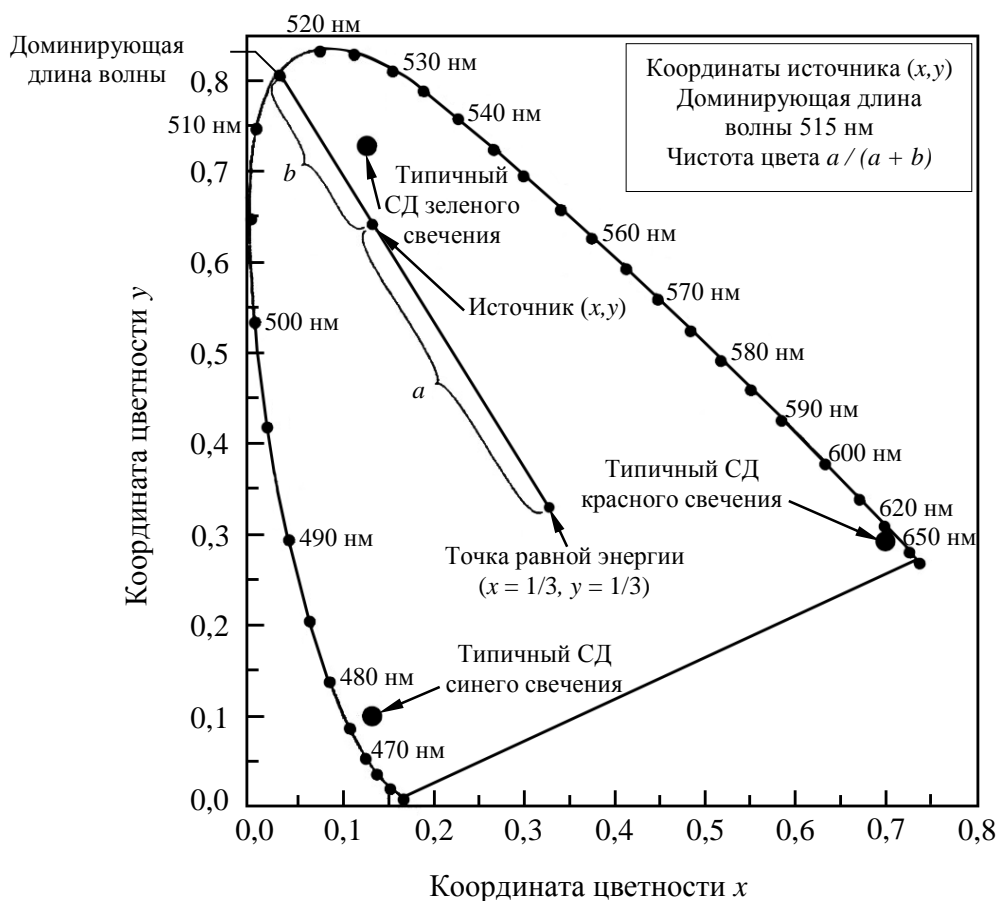


Рис. 2.2. Цветовая диаграмма, на которой показана процедура нахождения доминирующей длины волны и определения чистоты цвета источника излучения с координатами цветности (x, y)

Отметим, что доминирующая длина волны и чистота цвета — альтернативные параметры, характеризующие положение излучателя на цветовой диаграмме. Доминирующая длина волны и чистота цвета являются воспринимаемыми понятиями и, в отличие от численных значений координат цветности, удобны для практического использования.

Для белых излучателей одним из важнейших параметров является цветовая температура (ССТ). Цветовая температура — это характеристика хода интенсивности излучения источника света как функции длины волны в оптическом диапазоне. Согласно формуле Планка, цветовая температура опреде-

ляется как температура абсолютно чёрного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение.

## 2.2. Описание установки

Лабораторный стенд (рис. 2.3) состоит из блока с 12 излучателями, первый из которых лампа накаливания, другие — светоизлучающие диоды разных цветов. Стенд содержит в себе блок питания (БП) излучателей, вольт- и амперметра, 12 излучателей. С помощью ручки «регулировка тока» изменяются токи, протекающие через излучатель. Ток и напряжение отображаются на амперметре и вольтметре. На стенд устанавливается фотометрическая сфера, которая соединена с USB спектрометром с помощью оптоволоконна. Свет от излучателя поступает в интегральную сферу и по оптоволокну направляется в USB спектрометр. Внутри USB спектрометра свет раскладывается при помощи оптической призмы в спектр, который попадает на фоточувствительную линейку.

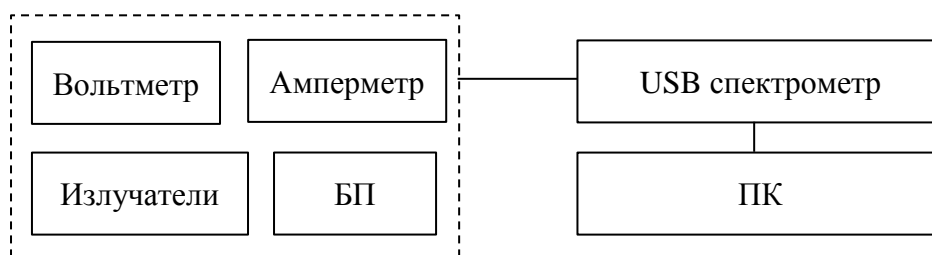


Рис. 2.3. Схема установки

Таким образом, получается информация о мощности сигнала для определённой длины волны (диапазона длин волн). В результате на персональном компьютере (ПК) отображается график люминесценции излучателя.

## 2.3. Порядок выполнения работы

При выполнении лабораторной работы необходимо сделать «протокол исследований» по образцу:



№ образца	Цвет	$I_{\min}$	$U_{\min}$	$I_{\max}$	$U_{\max}$

Выполнили:

гр. 0000

Ф.И.О.

Выполнение лабораторной работы необходимо осуществлять по следующему алгоритму.

1. Откройте программу ColorLAB.llb на рабочем столе.
2. Убедитесь, что лабораторный стенд выключен (индикаторы на лицевой панели должны быть выключены).
3. Установите во входное окно сферы излучатель № 1 (излучатель № 1, в отличие от остальных светодиодов, является миниатюрной лампой накаливания).
4. Выберите папку для сохранения результатов эксперимента. Для этого нажмите кнопку . Нажав кнопку «Browse», перейти в папку D:\Students, создать папку группу (если ее еще нет) и бригады (например, D:\Students\6202\6202-1\). Зайдите в папку, нажмите кнопку «Current Folder».
5. Запустите программу. Для этого нажмите кнопку . По истечении некоторого времени на лицевой панели программы появится диалоговое окно с сообщением о необходимости выключения лабораторного стенда («Switch off stand and press to continue»). Если стенд выключен, нажмите кнопку «Продолжить» («continue»). В ином случае выключите лабораторный стенд, повернув ручку регулировки тока до щелчка против часовой стрелки, и только после этого нажмите кнопку «Продолжить» («continue»).
6. Далее появится диалоговое окно, в котором необходимо задать номер исследуемого светодиода («Select LED number»). Для этого в поле «Номер светодиода» введите цифру 1 и выберите ручкой выбора излучателя на стенде нужный излучатель.
7. Нажмите кнопку «Начать измерение». При помощи графиков «Темновой спектр» и «Текущий спектр», убедитесь в том, что программа работает исправно (рис. 2.4). «Темновой спектр» должен представлять собой шум («белый шум») — относительно ровный спектр (с учетом помех) во всем измеряемом диапазоне длин волн, примерно на уровне интенсивности 1700 усл. ед. Обратите внимание, что спектр излучателя имеет иную (колоколообразную) форму.
8. В процессе лабораторной работы необходимо измерить 6 спектров каждого излучателя при разных токах. Начинать измерения следует с тока, при котором появляется сигнал в окне «текущий спектр», и до максимального значения тока, через каждые 3-4 мА.

9. При помощи тумблера «Регулятор тока» установите минимальный ток на светодиоде. Убедитесь при помощи графика «Текущий спектр», что на спектрометр поступает сигнал. Если сигнала нет (рис. 2.5), подайте на светодиод больший ток. При необходимости увеличивайте ток до тех пор, пока не появится сигнал (рис. 2.6).

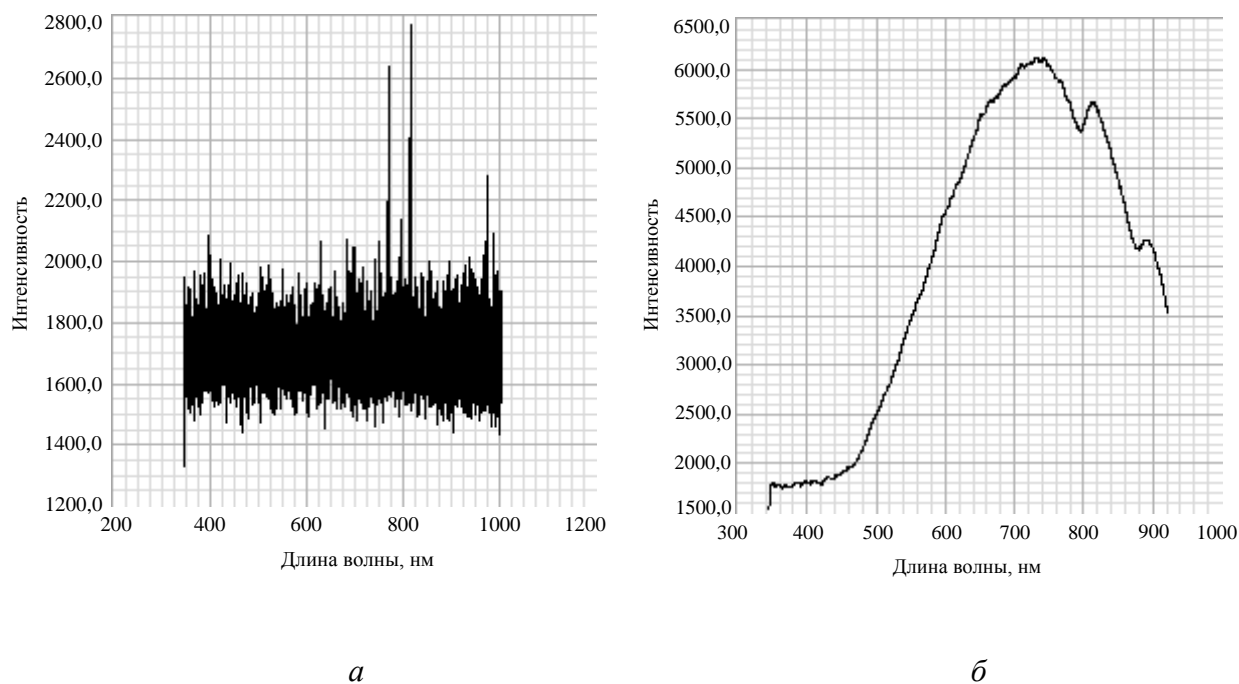


Рис. 2.4. Вид спектров: а – темновой спектр; б – текущий спектр

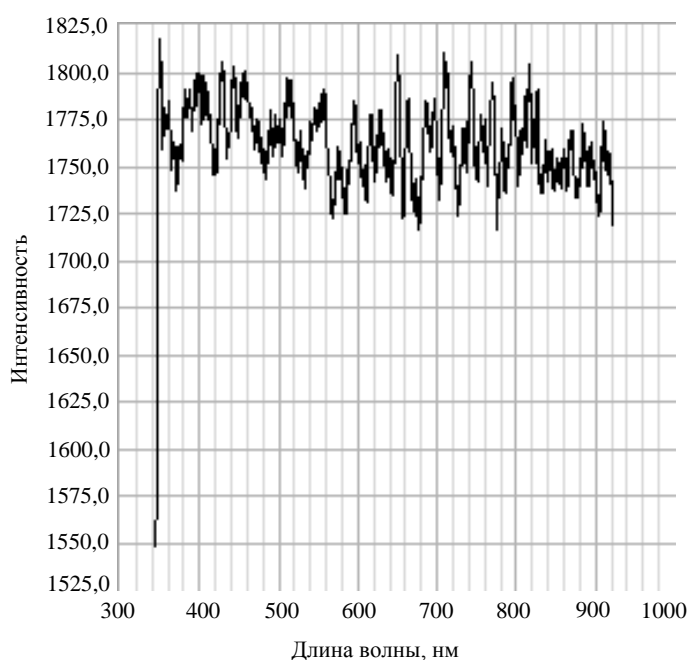


Рис. 2.5. Вид графика «Текущий спектр» при отсутствии сигнала

10. Нажмите кнопку «Записать спектр». В появившемся диалоговом окне запишите значения тока и напряжения, отображаемые на лицевой панели лабораторного стенда. Нажмите «ОК».

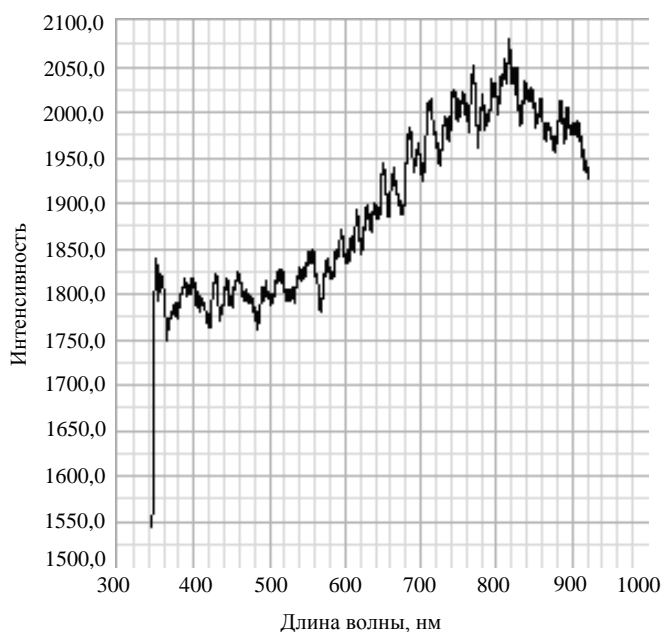


Рис. 2.6. Вид графика «Текущий спектр» при появлении сигнала

11. Далее нажмите кнопку «Следующее измерение». Задайте следующий ток излучателя на стенде. Убедитесь, что интенсивность люминесценции увеличилась. Затем нажмите кнопку «Запись спектра».

12. Проконтролируйте сохранение файлов.

13. Повторяйте пункты 9–11 до тех пор, пока спектр люминесценции текущего излучателя не будет измерен при значениях тока, указанных в п. 8.

14. Повторите пункты 2–12 для всех остальных излучателей. Чтобы перейти к измерению следующего излучателя, переключите тумблер «Номер светодиода».

15. Сохраните картинку (скриншот) лицевой панели программы. Ее изображение необходимо вставить в отчет.

16. Выключить лабораторный стенд.

## 2.4. Обработка результатов и содержание отчета

Отчет должен содержать следующие результаты.

1. Цель работы.
2. Блок-схема измерительной установки.

3. Краткое описание методов исследования цветовых характеристик светодиодов (СИД).
4. Спектры люминесценции, измеренные при различных токах. Для каждого излучателя спектры должны быть построены на отдельном графике. Обязательно на графиках выбрать по осям интересующий диапазон по длинам волн и интенсивностям. Подписать оси и единицы измерения.
5. Зависимость длины волны в максимуме излучения и доминантной длины от тока для каждого светодиода на одном графике.
6. Зависимость цветовой температуры (ССТ) от тока для белых излучателей (график).
7. Результаты расчета ССТ белых излучателей.
8. На цветовой диаграмме отметить цвет исследуемых излучателей, пользуясь цветовыми координатами.
9. Выводы с подробным описанием каждой полученной характеристики.

## **2.5. Контрольные вопросы**

1. Что такое доминирующая длина волны излучателя?
2. Как определить чистоту цвета излучателя?
3. Можно ли по положению на цветовой диаграмме судить о ширине спектральной характеристики излучателя?
4. Как кривая видности глаза человека влияет на форму цветовой диаграммы?
5. В чем отличие диаграммы цветности от других вариантов описания цветовых характеристик излучателей (в частности, системы RGB)? Каковы преимущества и недостатки этих систем?
6. Пользуясь таблицей Менделеева, поясните отличия в положении на цветовой диаграмме точек двух светодиодов, изготовленных на основе твердых растворов GaAsP с разным соотношением GaP/GaAs.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ГЕТЕРОЛАЗЕР**

Целью работы является исследование характеристик и определение основных параметров полупроводникового инжекционного гетеролазера.

### 3.1. Принцип действия полупроводникового инжекционного лазера

Полупроводниковые лазеры составляют особую группу среди лазеров на основе твердого тела. Важнейшим преимуществом использования полупроводников в качестве активных сред лазеров является возможность прямого преобразования электрической энергии в энергию когерентного электромагнитного излучения. При этом теоретически возможно получение коэффициента полезного действия приборов этого типа, близкого к 100 %.

В отличие от других активных сред, используемых для создания лазеров, энергетический спектр полупроводника имеет широкие полосы разрешенных состояний электронов (зону проводимости и валентную зону), которые разделены запрещенной зоной. При этом состояния электронов в зоне проводимости и в валентной зоне описываются не локализованными волновыми функциями, а блоховскими функциями, «размазанными» в пространстве. Соответственно, каждый из электронов в кристалле нельзя рассматривать как принадлежащий отдельному атому. Поэтому условие инверсии, записанное в обычном виде ( $N_m > N_n$  при  $E_m > E_n$ ), для полупроводников неприемлемо.

Условие усиления электромагнитной волны в полупроводнике можно получить, если рассмотреть полное число переходов с поглощением и испусканием фотонов. Если учитывать только переходы зона–зона, то число испущенных в результате индуцированного испускания фотонов будет превышать число поглощенных фотонов при выполнении условия

$$F_n^* - F_p^* > E_g, \quad (3.1)$$

где  $F_n^*$  и  $F_p^*$  – квазиуровни Ферми для электронов и дырок, а  $E_g$  – ширина запрещенной зоны.

Это соотношение по существу определяет условие инверсии населенности в полупроводнике для переходов зона–зона. Его физический смысл вполне очевиден: для того, чтобы обеспечить преобладание усиления за счет процессов вынужденного испускания над процессами собственного поглощения, необходимо создать такие избыточные неравновесные концентрации носителей в зоне проводимости и в валентной зоне, при которых расстояние между квазиуровнями Ферми будет превышать ширину запрещенной зоны полупроводника. Это означает, что один или оба квазиуровня Ферми должны находиться внутри разрешенных зон, т. е. возбуждение должно быть настолько интенсивное, чтобы создать вырождение в зоне проводимости и в валентной зоне.



В общем случае для любых типов излучательных переходов с испусканием фотонов  $\hbar\omega$  условие инверсии записывается в виде

$$F_n^* - F_p^* > \hbar\omega. \quad (3.2)$$

Условия (3.1), (3.2) являются необходимыми, но не достаточными для получения усиления или генерации в системе в целом. Достаточным условием здесь, как и в прочих типах усилителей и генераторов, является превышение усиления над всеми потерями. В полупроводниках с непрямой структурой энергетических зон выполнение этого условия затруднено. Поэтому в подавляющем большинстве случаев для получения лазерного эффекта используются полупроводники с прямой структурой энергетических зон, в которых вероятность излучательных переходов существенно превышает вероятность неактивного поглощения на свободных носителях заряда. Необходимым условием достижения лазерной генерации является также наличие положительной обратной связи в системе. Как и в других типах лазеров, эта задача может быть решена с помощью открытых резонаторов. Наиболее широко в полупроводниковых лазерах используется плоский резонатор (резонатор Фабри–Перо), поскольку его удобно изготовить сколами по кристаллографическим плоскостям, перпендикулярным плоскости  $p$ - $n$ -перехода лазерной структуры.

В инжекционном лазере для получения состояния с инверсией населенностей используется инжекция носителей заряда через  $p$ - $n$ -переход, смещенный в прямом направлении. При достаточно большом напряжении, приложенном в прямом направлении, вблизи  $p$ - $n$ -перехода возникает область с инверсной населенностью, как это показано на рис. 3.1, *а*. При малых плотностях тока имеет место рекомбинационное излучение, связанное со спонтанными переходами. По мере возрастания плотности тока коэффициент усиления растет до тех пор, пока не будет достигнуто пороговое значение, при котором возникнет лазерный эффект. В этом случае наблюдается резкое увеличение интенсивности и сужение спектра излучения лазерного диода.

Пороговое значение плотности тока может быть определено из соотношения:

$$j_{\text{пор}} = \frac{eBd}{A_0^2 \xi^2} \alpha_0 \xi + \beta_\omega + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (3.3)$$

где  $L$  – длина резонатора;  $d$  – толщина активной области  $p$ - $n$ -перехода;  $\beta_\omega$  – показатель объемных потерь;  $B$  – коэффициент рекомбинации;  $\xi$  – коэффициент удержания света;  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Пороговая плотность тока, как видно из (3.3), снижается по мере уменьшения размеров активной области  $d$ . В обычных  $p$ - $n$ -переходах с гомоструктурой размер этой области в основном определяется диффузионной длиной инжектируемых носителей заряда и не может быть искусственно ограничен. Как видно из данных рис. 3.1, существует перепад показателя преломления в области объемного заряда, что приводит к некоторой локализации электромагнитного поля вследствие волноводного эффекта. Однако этот перепад невелик (менее 1 %) и практически не может управляться извне, поэтому его влияние на снижение порогового тока не столь существенно.

Использование гетеропереходов для создания инжекционных лазеров дает целый ряд преимуществ по сравнению с гомопереходами, особенно при использовании двойных гетероструктур (ДГС-лазеры). Для изготовления гетеролазеров в основном применяются полупроводниковые соединения  $A^3B^5$  и твердые растворы на их основе, в частности арсенид галлия и твердые растворы типа  $Ga_{1-x}Al_xAs$ . Диаграммы, поясняющие принцип и особенности работы таких лазеров, приведены на рис. 3.1, б. Активная область инжекционного гетеролазера на основе арсенида галлия представляет собой тонкий слой GaAs с  $d \approx 0,3$  мкм. Электроны и дырки инжектируются в него из широкозонных  $N$ - $Ga_{1-x}Al_xAs$  и  $P$ - $Ga_{1-x}Al_xAs$ -областей, выполняющих функцию эмиттеров. Это позволяет создавать в активной области концентрацию избыточных носителей заряда, превышающую равновесную концентрацию этих носителей в широкозонном эмиттере (эффект *сверхинжекции*), что снимает необходимость сильного легирования эмиттера. Кроме того, имеются потенциальные барьеры, препятствующие диффузии инжектированных носителей из слоя GaAs – возникает эффект *электронного ограничения*.

Важно, что у  $Ga_{1-x}Al_xAs$  показатель преломления существенно меньше, чем у GaAs, причем разница показателей преломления может достигать величины  $\Delta n \approx -0,4$ . Это означает наличие диэлектрического волновода, обеспечивающего сильную локализацию поля (эффект *оптического ограничения*). Таким образом, пороговый ток снижается не только за счет уменьшения толщины активной области, но и за счет уменьшения коэффициента потерь  $\xi$  из-за того, что ограничивается проникновение поля в соседние

$p$ - и  $n$ -области с большими потерями. Оптимизация параметров гетероструктуры по электронному и оптическому ограничениям позволяет снизить величину порогового тока при комнатной температуре до значения  $j_{\text{пор}} \leq 1 \text{ кА/см}^2$  по сравнению с  $j_{\text{пор}} \leq 100 \text{ кА/см}^2$ , характерного для гомоструктур.

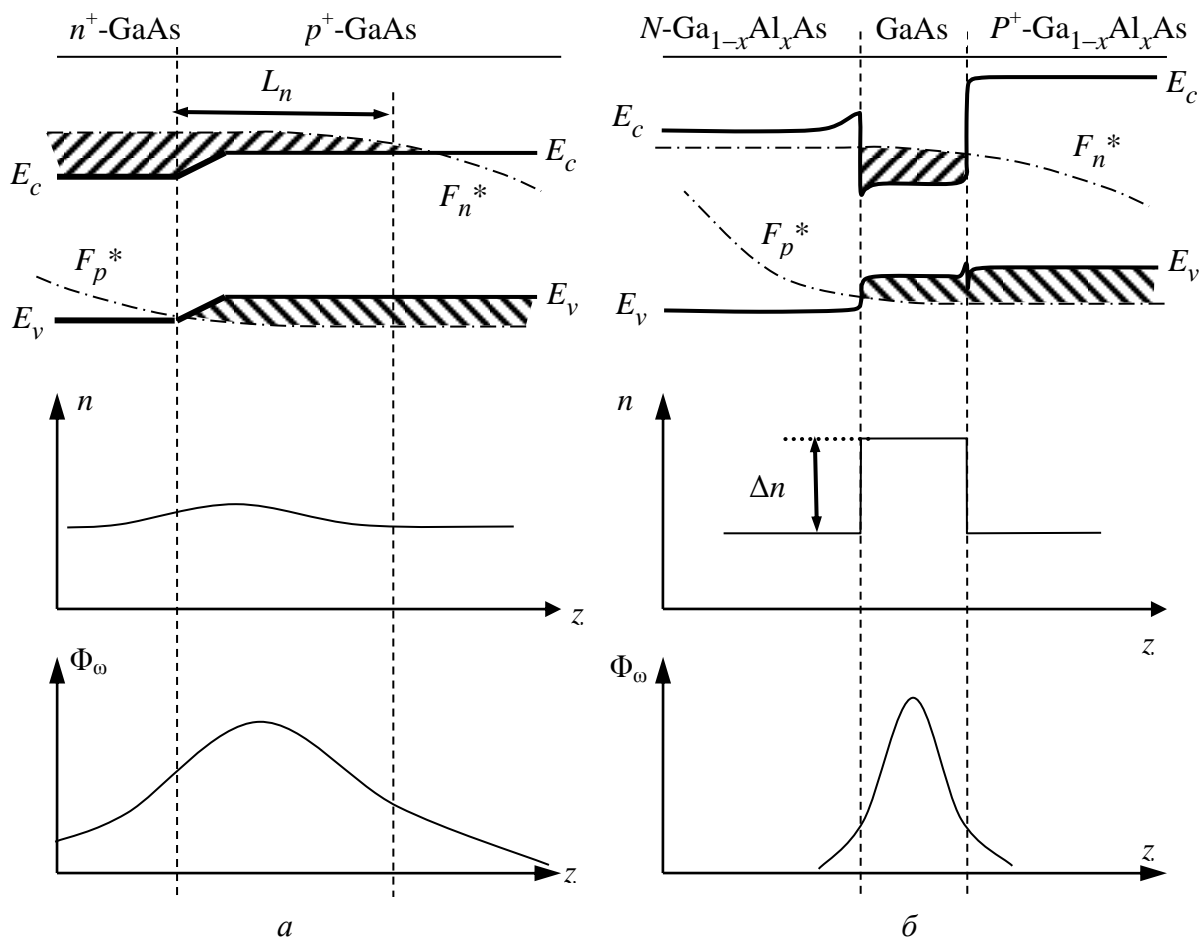


Рис. 3.1. Энергетические диаграммы, профиль показателя преломления  $n$  и распределение интенсивности электромагнитного поля  $\rho_\omega$  в диодах с гомоструктурой и двойной гетероструктурой

Для дальнейшего уменьшения  $j_{\text{пор}}$  применяют структуры с отдельным электронным и оптическим ограничением (РО ДГС-лазеры), содержащие в активной области квантово-размерные наноструктуры (квантовые ямы и точки).

**Рабочие характеристики инжекционных лазеров.** Электрические характеристики, выходная мощность и спектры излучения определяются особенностями конструкции и материалом активной области. Типичная вольт-амперная характеристика ДГС-лазера с широким контактом на основе приведена на рис. 3.2. Напряжение, при котором ток равен 1 мА, обычно составляет 1,1...1,2 В. Если при таком напряжении ток прямого смещения значитель-

но превосходит 1 мА, то это свидетельствует о наличии дополнительных паразитных каналов избыточного тока, приводящих к увеличению  $J_{\text{пор}}$ . Напряжение пробоя при обратном смещении зависит от уровня легирования. Характерное значение – около 5–10 В.

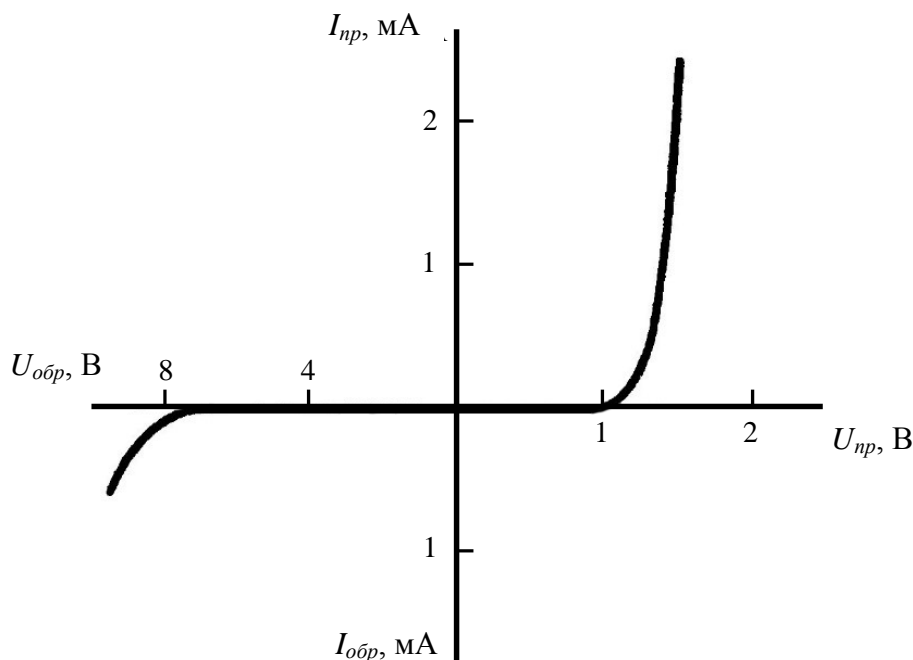


Рис. 3.2. Типичная вольт-амперная характеристика ДГС лазера с широким контактом

Ток в прямом направлении при его изменении от  $10^{-10}$  до  $10^{-3}$  А хорошо описывается соотношением  $I_{\text{пр}} \sim \exp(eU/2kT)$ . При больших токах на вольт-амперную характеристику начинают влиять разогрев и падение напряжения на контактах и в приконтактных областях.

Типичные спектры излучения ДГС-лазера приведены на рис. 3.3. В лазерах с широким контактом или с большой шириной полоска в зависимости выходной мощности от тока накачки могут наблюдаться характерные изломы, вызванные нестабильностью работы. В полосковых лазерах с узким контактом эти неприятности отсутствуют.

Спектр излучения при токах ниже порогового представляет собой сравнительно широкую полосу, обусловленную межзонными или квазимежзонными спонтанными переходами в активной области гетеролазера. При приближении к порогу в спектре излучения возникает модовая структура, которая при токе вблизи порогового проявляется очень отчетливо (рис. 3.3). Этот режим работы называется сверхлюминесценцией, или суперлюминесценцией: в активной области создана инверсия населенности, но ее еще не

хватает для начала генерации, т. е. еще не выполнено условие самовозбуждения. При  $J > J_{\text{пор}}$  спектр излучения сужается, увеличивается направленность и когерентность излучения. При изменении плотности тока накачки возможен перескок с одной моды на другую. При увеличении тока накачки максимум спектральной зависимости показателя усиления сдвигается в коротковолновую область. Одновременно при больших  $J$  происходит нагрев кристалла, за счет чего спектр сдвигается в длинноволновую область. Часто второй эффект преобладает над первым.

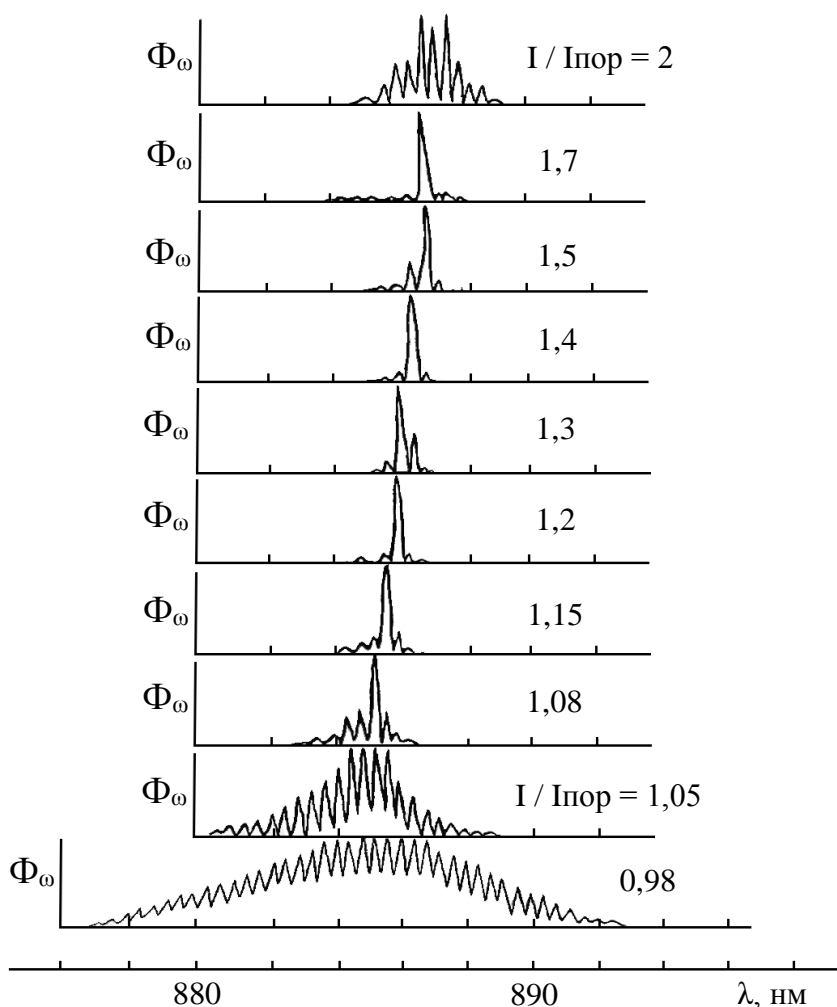


Рис. 3.3. Изменение спектра излучения ДГС-лазера с изменением тока накачки.  
Ширина полоска 0,3 мкм;  $I_{\text{пор}} = 50$  мА

На рис. 3.4 приведена ватт-амперная характеристика лазера на гетеро-структуре и спектры излучения в разных ее точках. Если в активной области лазера имеются факторы, приводящие к неоднородному уширению спектральной линии люминесценции (например, неоднородность состава по площади активного слоя), то даже в полосковом РОДГС-лазере велика вероят-

ность генерации в многомодовом режиме с участием нескольких продольных мод.

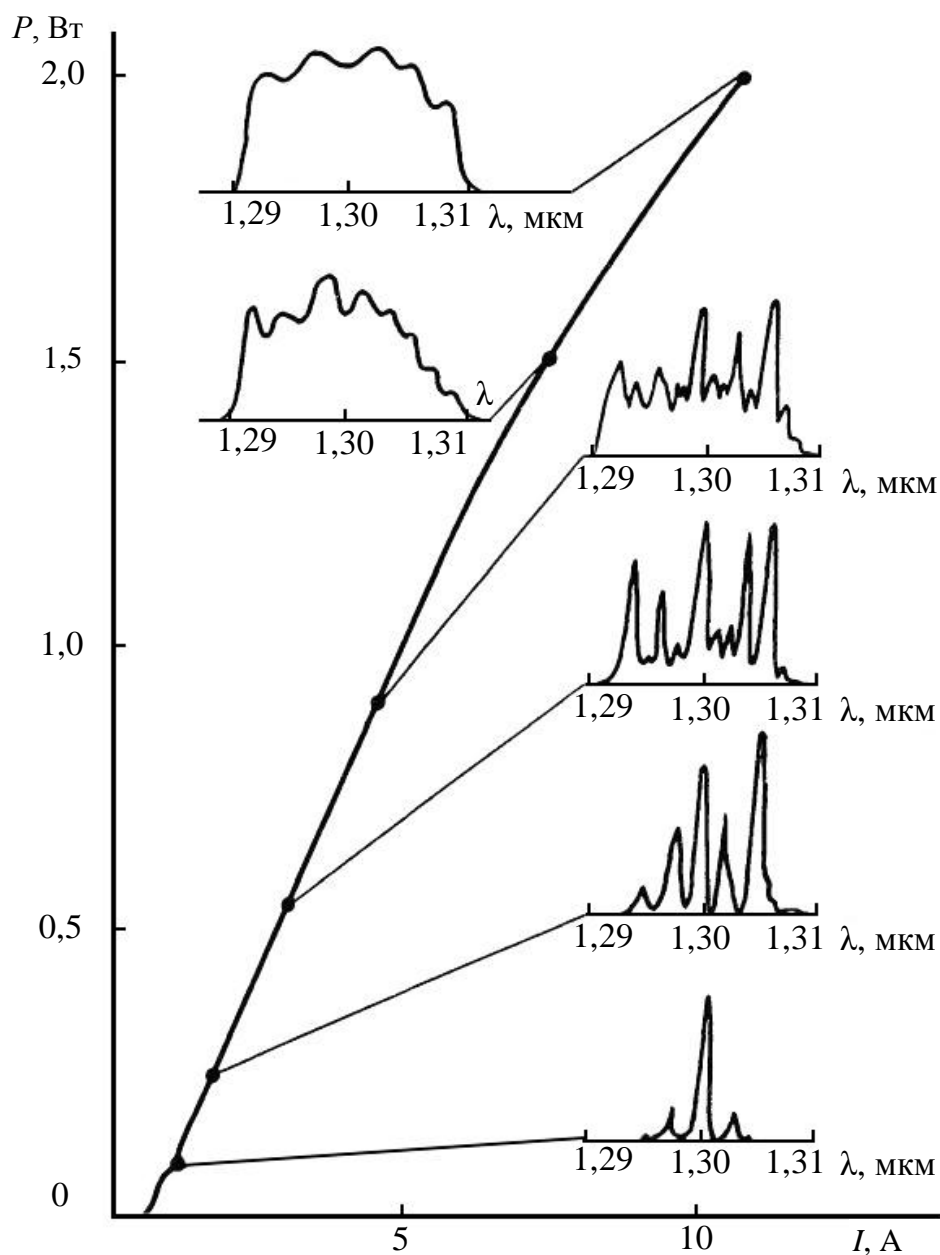


Рис. 3.4. Ватт-амперная характеристика ДГС-лазера

Диаграмма направленности инжекционного лазера определяется теми же факторами, что и у лазеров других типов. Для основной моды угол расходимости дается соотношением:

$$\Theta_D = \lambda\beta/d, \quad (3.4)$$

где  $\beta$  – числовой коэффициент порядка единицы; его точное значение зависит от распределения амплитуды поля, а также от способа которым опреде-

лены  $\Theta_D$  и  $d$ . Так как поперечные размеры активной области в полупроводниковых лазерах очень малы, то дифракционная расходимость будет велика. В плоскости, перпендикулярной активному слою, она будет определяться толщиной области оптического ограничения  $D$ , а в плоскости  $p$ – $n$ -перехода – шириной области генерации или шириной полоска  $W$  в полосковом лазере. Так как  $D < W$ , то угол расходимости излучения в плоскости  $p$ – $n$ -перехода  $\Theta_n$  будет меньше, чем в перпендикулярной плоскости. Картина излучения полоскового гетеролазера работающего в одномодовом режиме, в дальней зоне представляет собой эллипс, расширяющийся в направлении, перпендикулярном поверхности слоя (рис. 3.5). Для его фокусировки могут быть использованы цилиндрические линзы.

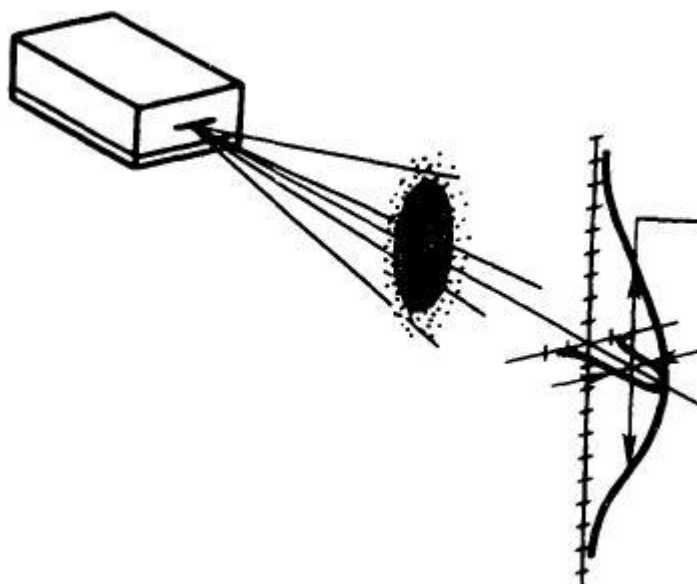


Рис. 3.5. Диаграмма направленности и картина дальнего поля ДГС-лазера

Важное влияние на характеристики ИПЛ оказывает *температура*. Наиболее сильно она влияет на пороговый ток и мощность излучения, что вызвано в основном двумя причинами. Во-первых, с увеличением температуры происходит «размазывание» носителей по энергии. Во-вторых, с увеличением температуры обычно происходит снижение эффективности люминесценции в активной области (температурное гашение люминесценции), приводящее к уменьшению квантового выхода и времени жизни неравновесных носителей заряда в активном слое. Поэтому в полупроводниковых лазерах следует самое серьезное внимание уделять теплоотводу. Обычно темпера-

турная зависимость пороговой плотности тока в области  $T > 250$  К приближенно описывается экспоненциальной функцией.

Изменение ширины запрещенной зоны с температурой вызывает сдвиг спектра лазерного излучения. Если лазер работает в многомодовом режиме, то увеличение температуры приводит к плавному смещению огибающей спектра в длинноволновую область. Если лазер работает в одномодовом режиме, то увеличение температуры будет приводить к скачкообразным изменениям  $\lambda_{\text{ген}}$ , определяемым перескоком с одной моды на другую при изменении ширины запрещенной зоны.

Необходимым условием достижения лазерной генерации является также наличие положительной обратной связи в системе. Для этого в полупроводниковых лазерах в основном используется плоский резонатор (резонатор Фабри–Перо), поскольку его удобно изготовить сколами по кристаллографическим плоскостям, перпендикулярным плоскости  $p$ – $n$ -перехода в лазерной структуре. Такой метод позволяет быстро изготовить зеркала высокого качества. Однако у сколотых зеркал есть существенный недостаток – коэффициент отражения  $R$  в этом случае определяется соотношением показателей преломления полупроводника и воздуха. Тогда для лазеров на основе типичных полупроводников  $R \approx 30\%$ , причем вывод излучения будет происходить через оба зеркала резонатора, что приводит к высоким оптическим потерям. Для повышения коэффициента отражения можно на одну из граней излучателя нанести слой металла, например, алюминия.

Типичный ДГС-лазер работает в многомодовом режиме. Взаимодействие неаксиальных мод приводит к биениям и неустойчивости излучения лазера, зависящим от плотности тока накачки. Для селекции поперечных мод следует ограничить ширину активной области. Для этого используются полосковые лазеры. На рис. 3.6, *a* показан полосковый лазер с резонатором Фабри–Перо, созданный на основе изопериодной РО ДГС GaInPAs/InP. Активная область (АО), ширина запрещенной зоны которой определяет длину волны излучения лазера, окружена двумя более широкозонными волноводными GaInPAs-слоями. В такой структуре электроны ограничены в АО и генерация происходит в ней, но оптическое ограничение существует в волноводных слоях, поэтому излучать также будет и волноводная часть структуры. Верхний контакт лазера касается полупроводника только узким полоском, и инжекционный ток в основном



протекает через центральную (заштрихованную) часть структуры, что позволяет уменьшить число генерируемых мод. К сожалению, такая структура практически не обеспечивает боковых электронного и оптического ограничений. Для возникновения таких ограничений необходимо изменить характеристики боковых областей, что может быть достигнуто за счет их бомбардировки протонами или травлением мезоструктуры.

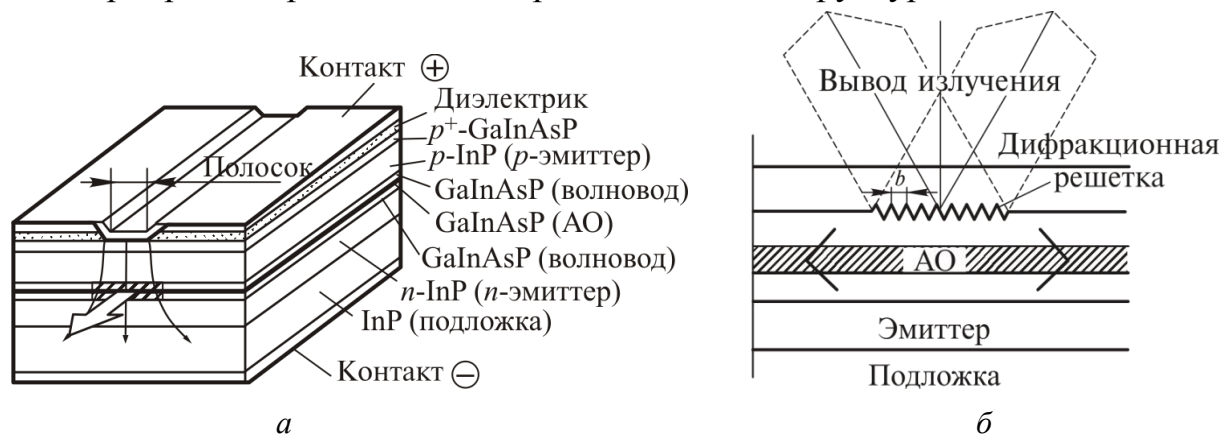


Рис. 3.6. Структура полупроводникового лазера: *a* – полосковый лазер; *б* – РОС-лазер с выводом излучения под углом к АО

Ряд преимуществ имеют лазеры, выполненные с использованием резонатора с распределенной обратной связью (РОС). Такие лазеры обладают высокой термостабильностью, поскольку длина волны излучения в них определяется не температурным изменением ширины запрещенной зоны полупроводника, а более слабой зависимостью показателя преломления от температуры. Кроме того, в РОС-лазерах нет нужды беспокоиться о качестве и оптической прочности зеркал. РОС возникает при рассеянии фотонов на периодических неоднородностях, период  $b$  которых подчиняется закону Вульфа–Брэгга:

$$b \sin \theta = m\lambda/2, \quad (3.5)$$

где  $m$  – порядок дифракции. Если  $b = \lambda/2n$ , то свет отражается только назад. При  $m \geq 2$  рассеяние света возможно также под углом к активной области, что позволяет сделать независимыми обратную связь и направление вывода излучения (рис. 3.6, *б*).

### 3.2. Описание установки

Блок-схема установки для исследования характеристик полупроводниковых лазеров изображена на рис. 3.7. Лазер без коллимационной системы (рис. 3.7, *а*) установлен в специальном держателе, который позволяет вра-

щать лазер в двух плоскостях и исследовать диаграмму направленности. Излучение, вышедшее из лазера, попадает в оптическое волокно, оно в свою очередь, соединено с оптоволоком, подключенным к спектрометру быстрого сканирования. Спектрометр позволяет проводить измерения спектральных характеристик лазера за время меньшее, чем 100 мс. Спектр излучения лазера отображается на экране монитора и может быть записан в память компьютера в виде текстового файла.

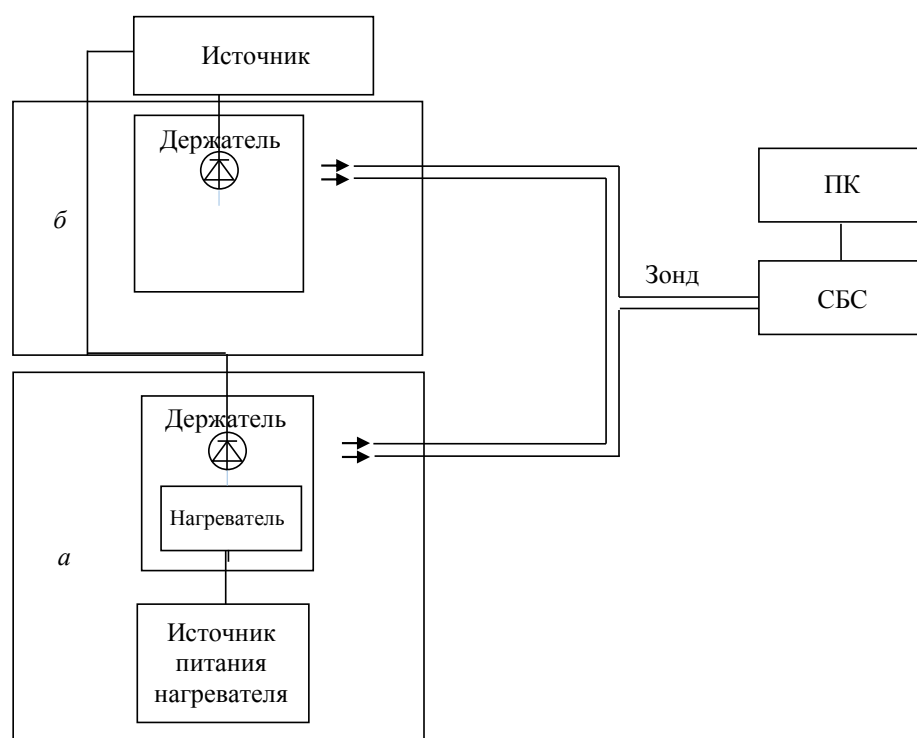


Рис. 3.7. Блок-схема оптической установки для исследования полупроводникового гетеролазера

На рис. 3.7, б представлена блок-схема оптической установки для исследования температурных зависимостей спектра излучения лазера, а также измерения ВАХ при различных температурах. В этом случае держатель является неподвижным, а лазер дополняется коллимационной системой. Излучение лазера попадает в оптическое волокно, которое соединено со спектрометром быстрого сканирования.

Нагреватель представляет собой два элемента Пельтье, температура которых управляется изменением тока на дополнительном источнике питания.

Второй лазер установлен в держателе для исследования диаграммы направленности излучения. Варианты вращения лазера продемонстрированы на рис. 3.8.

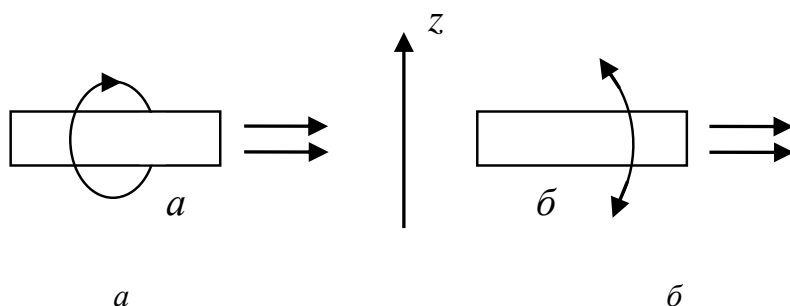


Рис. 3.8. Варианты вращения лазера с помощью держателя:  
*а* – вокруг оси лазера; *б* – перпендикулярно оси

### 3.3. Проведение измерений

При выполнении лабораторной работы необходимо оформить протокол исследований по образцу:

Что изменялось	Имя файла «от»	Имя файла «до»
Диаграмма излучения лазера № 1	0_60.txt	0_120.txt
	90_60.txt	90_120.txt

Выполнили:

гр. 0000

Ф.И.О.

Выполнение лабораторной работы необходимо осуществлять по следующему алгоритму.

1. Включить компьютер. Запустить программу SpectraSuite. Убедиться, что спектрометр обнаружился (появилось его изображение в левой панели 1, рис. 3.9), иначе вручную провести «рескан» приборов, для чего выбрать «Rescan Devices» в меню 2 «Spectrometer». Если спектрометр все равно не обнаружился, следует переключить USB-кабель в другой разъем и провести «рескан» заново.

2. Включить мультиметры и питание требуемого лазера на блоке управления лазерами.

3. Проверить, установлен ли лазер в положение 90° по верхней шкале и 0° по боковой шкале. Затем, регулируя высоту, угол поворота и сдвиг волно-

вода добиться максимума показаний спектрометра (если в этом есть необходимость).

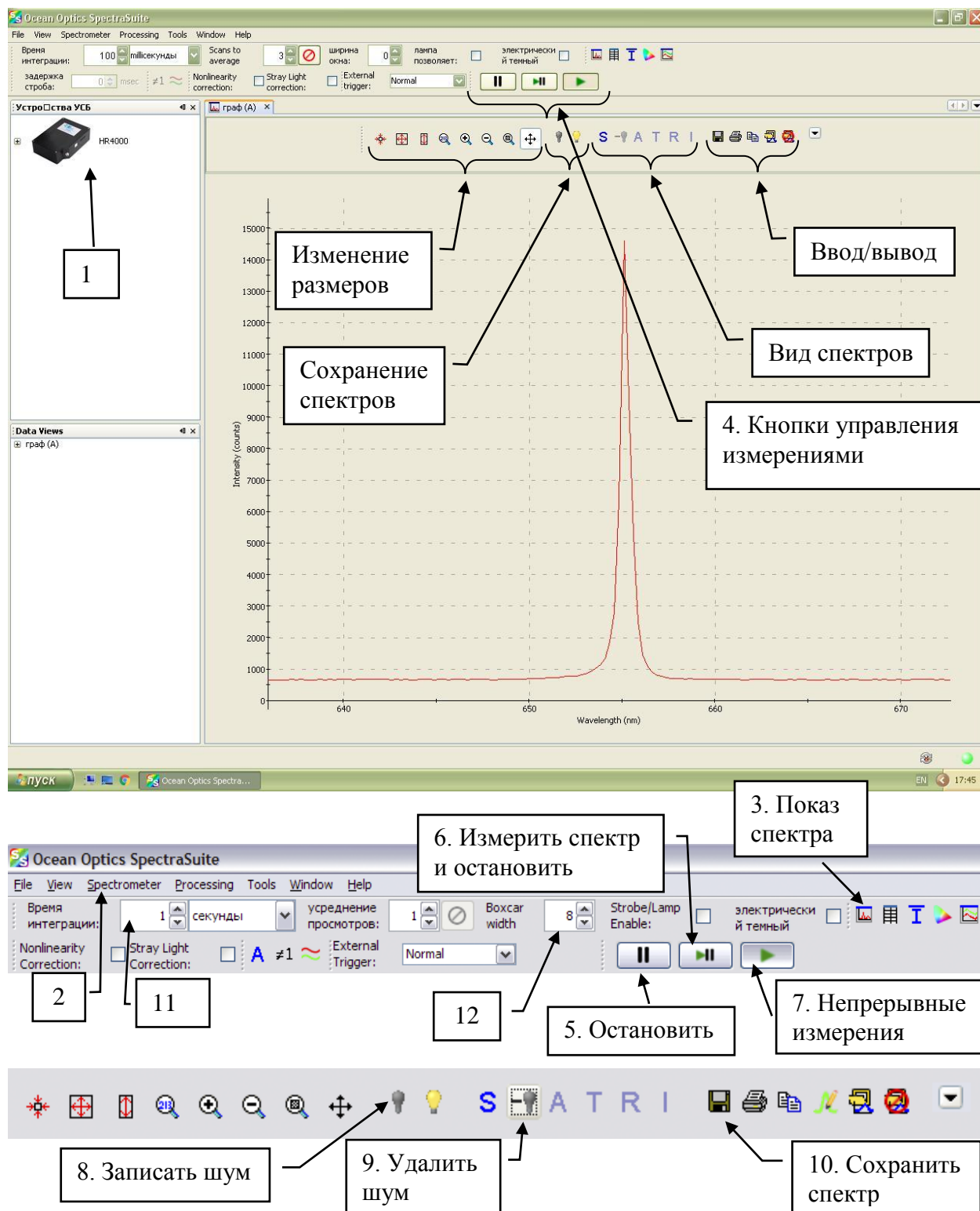


Рис. 3.9. Интерфейс программы SpectraSuite

4. Настроить диапазон измерения в программе SpectraSuite. Для этого, установить усреднение просмотров 3 ед., ток лазера 25 мА и изменить время интеграции (11) таким образом, чтобы интенсивность спектров на экране была максимальной, но при этом не было переполнения (полочки в верхней части спектра, спектр должен быть «острым»). Значение времени интеграции должно составить примерно 30 мс. Время интеграции для каждого лазера будет разным!

5. Сохранить спектр на диск компьютера. Для этого нажать кнопку (10) и в появившемся окне выбрать в графе «File type» выбрать пункт «Tab Delimited». Нажав кнопку «Browse», перейти в папку D:\Students, создать папку группы (если ее еще нет) и бригады (например, D:\Students\6202\6202-1\). Ввести имя файла в соответствующем поле. Рекомендуется использовать следующий формат названия: «I25 T20.txt», где I – обозначение тока накачки лазера, цифра рядом с буквой – значение тока в мА (I25 – ток I = 25 мА), T – температура (T20 – 20 °C). Окно папки закрыть и сохранить файл, нажав «Save». Следует обязательно убедиться, что файл сохранен в правильной папке в правильном формате (txt), для чего необходимо перейти в папку с помощью стандартного Проводника Windows, найти и открыть файл. Название каждого файла следует записывать в протокол измерений.

6. Измерить диаграммы направленности излучения лазера. Включить лазер 1. Установить максимальный ток накачки (примерно 25 мА). Подобрать масштаб графика в программе SpectraSuite по ширине окна. Подобрать время интеграции в программе, чтобы спектр не «обрезался» (интенсивность лазера должна быть около 13000 – 14000 усл. ед. при максимальном токе). Изменять угол наклона лазера по малой шкале от 60 до 120° через 5° и сохранять спектр излучения лазера в каждой точке. Затем установить угол поворота по большой шкале (вращение вокруг оси излучения лазера) на значение 90° и повторить измерения по малой шкале от 60 до 120° через каждые 5°.

7. Провести измерения ВАХ и влияния температуры на спектр излучения. Для этого необходимо выключить второй лазер (предназначенный для измерения диаграммы направленности излучения) и включить первый лазер на стенде. Подобрать время интеграции в программе, чтобы спектр не «обрезался» (интенсивность лазера при максимальном токе должна быть около 13000 – 14000 усл. ед. при максимальном токе).

8. Измерить вольт-амперные характеристики (ВАХ) и изменение спектра излучения лазера. Задавать нужное значение тока в пределах от 0 до 25 мА с интервалом в 3 мА и фиксировать соответствующие значения напряжения и тока по показаниям мультиметров, размещённых на лабораторном стенде, а также сохранять спектр в каждой точке ВАХ (вентиляторы должны быть включены).

9. Установить ток накачки  $I = 25$  мА с помощью вращения ручки подстроечного резистора, ориентируясь на показания мультиметра (вентиляторы должны быть включены).

10. Измерить спектры при различной температуре. Для этого включить источник питания термоэлемента Пельтье (кнопка включения на задней стенке источника). Регулируя силу тока, подаваемого на термоэлемент (**не превышать ток 2,5 А и напряжение 15 В**), изменять температуру в пределах от минимальной температуры (5 – 10 °С) до 50 °С с шагом примерно в 8 °С. При одной полярности питания термоэлемента Пельтье он охлаждается, при смене полярности – нагревается (вентиляторы должны быть включены).

11. Выключить питание лазеров, термоэлемента и мультиметры.

### 3.4. Обработка результатов и содержание отчета

Отчет должен содержать следующие результаты.

1. Цель работы.
2. Блок-схемы установки.
3. Вольт-амперные характеристики для разных значений температуры, представленные в виде графика. Построение зависимостей для каждого пункта выполняется на одном графике, если это не оговорено отдельно.
4. Спектральные характеристики при различных значениях прямых токов. Спектры должны быть построены на одном графике. Для каждой из осей на графиках должны быть обязательно выбраны оптимальные диапазоны длин волн и интенсивностей соответственно. На всех графиках должны быть обозначены величины, откладываемые по осям, и приведены единицы их измерения.
5. Зависимость длины волны, соответствующей максимуму излучения от тока, протекающего через лазер  $\lambda_{\text{max}} = f(I_{\text{пр}})$  в виде таблицы и графика.
6. Ватт-амперные характеристики, т. е. зависимость мощности излучения (рассчитываемой как площадь под спектральной характеристикой) от тока, протекающего через лазер  $P_{\text{max}} = f(I_{\text{пр}})$ .

7. Результаты определения порогового тока лазера из ватт-амперных характеристик.
8. Зависимость интенсивности излучения лазера от угла наклона лазера.
9. Спектры излучения лазера при разных значениях температуры на одном графике (на графике показывать только интересующий диапазон по длинам волн).
10. Зависимость длины волны в максимуме излучения от температуры.
11. Зависимость порогового тока лазера от температуры (на графике показывать только интересующий диапазон по длинам волн).
12. Выводы с подробным описанием каждой полученной характеристики.

### **3.5. Контрольные вопросы**

13. Пояснить особенности создания инверсной населенности в полупроводниках.
14. Перечислить и пояснить методы возбуждения, используемые в полупроводниковых лазерах.
15. Почему диаграммы направленности инжекционного лазера различны в разных плоскостях?
16. Дать описание экспериментальной установки и пояснить назначение ее отдельных элементов.
17. Пояснить влияние плотности тока на спектр излучения лазерного диода.
18. В чем заключаются преимущества гетероструктур перед обычными  $p$ - $n$ -переходами при создании инжекционных лазеров?
19. Пояснить эффекты односторонней инжекции, сверхинжекции и волноводный эффект в двойной гетероструктуре.
20. Чем определяются оптимальные размеры активной области лазера на двойной гетероструктуре (толщина, ширина и длина)?
21. В чем состоит принцип раздельного электронного и оптического ограничений и как он реализуется в РО ДГС-лазерах?

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОДИОДОВ**

Целью работы является исследование характеристик и определение основных параметров приемников оптического излучения – полупроводниковых фотодиодов.

## 4.1. Основные сведения о полупроводниковых фотодиодах

Фотодиоды в настоящее время являются наиболее распространенными приемниками излучения. Основным элементом фотодиода является  $p$ – $n$ -переход, наличие потенциального барьера и внутреннего электрического поля в котором создает благоприятные условия для пространственного разделения носителей заряда, созданных в результате фотоактивного поглощения света. Это позволяет использовать фотодиодные структуры как для детектирования электромагнитного излучения оптического диапазона, так и для генерирования фото-ЭДС и преобразования оптической мощности в электрическую.

Рассмотрим  $p$ – $n$ -переход, на который со стороны  $p$ -области падает оптическое излучение с энергией фотонов  $\hbar\omega$ , как это показано на рис. 4.1. Будем считать, что коэффициент поглощения  $k_\omega$  в полупроводнике не слишком велик и свет глубоко проникает в структуру, достигая

области объемного заряда и  $n$ -области. В этом случае в соответствии с законом Бугера–Ламберта в каждой из областей фотодиодной структуры будет происходить поглощение фотонов с энергией  $\hbar\omega > E_g$ . Электроны, находящиеся в валентной зоне, в результате квантовых переходов с поглощением фотона будут переходить в свободное состояние в зоне проводимости, а на их месте в валентной зоне появятся дырки, т. е. будет происходить процесс генерации электронно-дырочных пар (внутренний фотоэффект). У фотонов с  $\hbar\omega < E_g$  будет недостаточно энергии для генерации пар, и фотоактивного поглощения происходить не будет.

Если поглощение фотона произошло в  $p$ - или  $n$ -области далеко от области объемного заряда, то для сгенерированных неравновесных носителей будет очень высока вероятность рекомбинации. В области объемного заряда  $p$ – $n$ -перехода существует внутреннее электрическое поле  $E$ , под воздействием которого свободные носители заряда будут перемещаться в противоположных направлениях: электроны – против поля в  $n$ -область, а дырки – по полю в  $p$ -область (процесс 1 на рис. 4.1). Однако толщина слоя объемного заряда

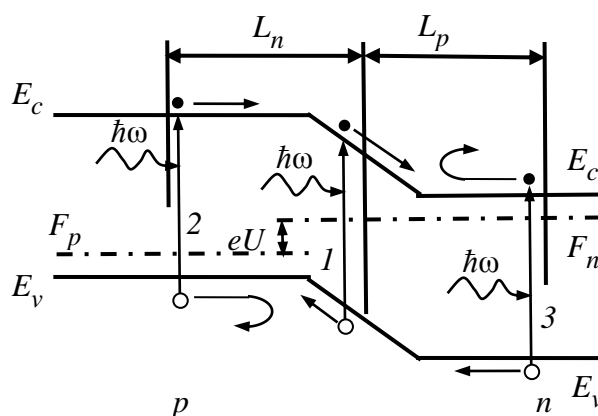


Рис. 4.1. Фотоэлектрические процессы в  $p$ – $n$ -переходе



обычно очень мала, поэтому вероятность поглощения фотона в этой области также незначительна. Генерация светом избыточных носителей заряда происходит в основном в областях, непосредственно примыкающих к  $p$ – $n$ -переходу (процессы 2 и 3). Эти избыточные носители заряда диффундируют к области объемного заряда. Если генерация произошла на расстоянии меньшем, чем диффузионная длина  $L_n$  или  $L_p$  для неосновных носителей заряда, то они успеют дойти до  $p$ – $n$ -перехода, не рекомбинируя с основными носителями. В области объемного заряда неосновные носители подхватываются полем и выбрасываются в противоположную область структуры. Созданные светом и разделенные  $p$ – $n$ -переходом избыточные носители заряда накапливаются в разных областях, при этом  $p$ -область будет заряжаться положительно, а  $n$ -область – отрицательно.

Таким образом, под действием света в  $p$ – $n$ -переходе происходит разделение носителей заряда и в режиме холостого хода в фотодиоде возникает разность потенциалов  $U_x$ . При замыкании контактов через нагрузку будет течь фототок  $I_\phi$ , пропорциональный скорости генерации  $G$  избыточных электронно-дырочных пар в области, ограниченной диффузионными длинами неосновных носителей заряда. Этот фототок будет изменять (уменьшать) контактную разность потенциалов, вследствие чего через переход начнет проходить ток в прямом направлении:

$$I = I_S \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (4.1)$$

где  $I_S$  – ток насыщения, который создается свободными носителями заряда, генерируемыми за счет теплового возбуждения.

Фототок обусловлен неосновными носителями заряда, поэтому он совпадает по направлению с обратным током  $p$ – $n$ -перехода. Можно считать, что величина фототока практически не зависит от приложенного напряжения. Тогда вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотодиода (4.1) при освещении имеет следующий вид:

$$I = I_S \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) - I_\phi. \quad (4.2)$$

Это общее уравнение фотодиода. ВАХ  $p$ – $n$ -перехода в отсутствии освещения ( $G = 0$ ) и при воздействии света ( $G > 0$ ) представлена на рис. 4.2. При разо-

мкнутой цепи (режим холостого хода) фотоЭДС  $U_x$  определяется из (4.2) при  $I = 0$ :

$$U_x = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_\Phi}{I_S} + 1 \right). \quad (4.3)$$

Из (4.2) при  $U = 0$  (режим короткого замыкания) находим, что ток короткого замыкания равен фототоку:

$$I_K = I_\Phi. \quad (4.4)$$

Фотодиод может использоваться в двух режимах работы – фотодиодном и вентильном (режиме генерации фотоЭДС). В первом случае на диод подается обратное напряжение, и ток через структуру является функцией интенсивности света. Фотодиодному режиму соответствует третий квадрант вольт-амперной характеристики (рис. 4.2). В этом режиме фотодиод работает как фотодетектор и используется для регистрации электромагнитного излучения с длиной волны, лежащей внутри диапазона чувствительности фотоприемника. Зависимость фототока от величины светового потока  $\Phi$  для такого режима работы является линейной. Аналогичная зависимость наблюдается для фототока короткого замыкания  $I_K$ .

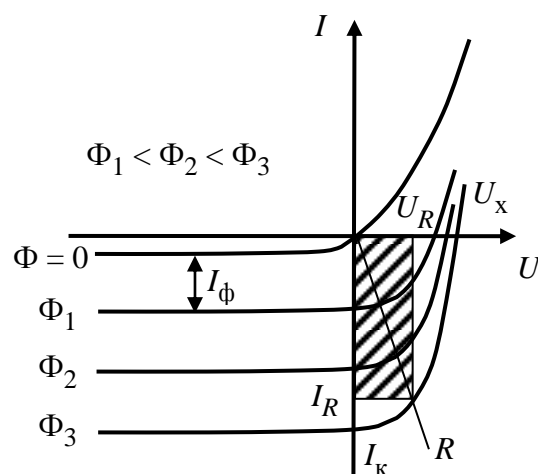


Рис. 4.2. Вольт-амперная характеристика  $p$ – $n$ -перехода в отсутствие освещения ( $\Phi = 0$ ) и при воздействии света ( $\Phi > 0$ )

В вентильном режиме фотодиод сам используется в качестве источника напряжения или тока. Такому режиму соответствует второй квадрант ВАХ. При этом фотодиод нагружен на сопротивление  $R$ , ток и напряжение находят из общего уравнения фотодиода (4.2)

$$U_R = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_R + I_\Phi}{I_S} + 1 \right), \quad (4.5)$$

где  $I_R = U_R/R$ .

В вентильном режиме фотодиод работает как преобразователь оптической энергии в электрическую. Мощность, снимаемая с фотодиода, определяется площадью квадрата, ограниченного  $I_R$  и  $U_R$  (рис. 4.2). Этот режим

используется при работе солнечных батарей. В режиме генерации фотоЭДС на зависимость фототока от величины светового потока  $\Phi$  существенное влияние оказывает величина нагрузочного сопротивления  $R$ .

Величина фотоотклика, возникающего в фотодиоде при освещении его излучением  $\Phi$  мощностью  $P$ , определяется *квантовой эффективностью*, или *квантовым выходом*, представляющим собой число фотогенерированных электронно-дырочных пар, отнесенное к числу падающих фотонов:

$$\eta = \frac{J_{\Phi} / e}{\Phi / A} = \frac{I_{\Phi} / e}{P / \hbar\omega}, \quad (4.6)$$

где  $J_{\Phi}$  – плотность фототока;  $A$  – площадь освещаемой поверхности фотодиода. Однако обычно сравнительным критерием качества фотодиодов является *чувствительность*, которая определяется как отношение фототока к величине светового потока:

$$S_I = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}. \quad (4.7)$$

Чувствительность связана с квантовым выходом фотодиода (4.6):

$$S_I = \frac{e\eta}{\hbar\omega}. \quad (4.8)$$

Спектральная зависимость чувствительности является одной из важнейших характеристик фотодиода. Рассмотрим  $p$ – $n$ -переход, освещенный со стороны  $p$ -области. Если толщина этой области меньше диффузионной длины для электронов ( $d < L_n$ ), то все фотогенерированные в  $p$ -слое носители заряда дойдут до  $p$ - $n$ -перехода и дадут вклад в фотоэффект. При малых значениях  $(\hbar\omega - E_g)$  фототок пропорционален показателю поглощения, и при  $k_{\omega} < 1/d$  спектральная зависимость фототока будет определяться спектром поглощения. При продвижении в коротковолновую область при  $\hbar\omega > E_g$  показатель поглощения быстро возрастает, и в случае  $k_{\omega} \gg 1/d$  практически все излучение будет поглощаться в  $p$ -области. Дальнейшее увеличение  $k_{\omega}$  не приводит к росту фототока.

Если толщина  $p$ -области больше диффузионной длины  $L_n$  ( $d > L_n$ ), то при увеличении  $k_{\omega}$  все большая часть излучения будет поглощаться вдали от  $p$ – $n$ -перехода и все меньшая часть генерированных неосновных носителей заряда достигать области объемного заряда. Поэтому при  $d > L_n$  в спектрах фотоЭДС и фототока будет наблюдаться максимум.

## 4.2. Описание установки

Лабораторный стенд содержит три различных фотодиода и три светодиода, расположенных так, чтобы каждый светодиод освещал свой фотодиод. Также в установке присутствует набор сопротивлений с разными номиналами, переключатели, три мультиметра, расположенные на лицевой панели установки, что дает возможность исследовать работу фотодиодов во всех основных режимах.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие фотодиоды на основе кремния, отличающиеся квантовой эффективностью: ФД263–01, ФД256 и ФД265А, которые в дальнейшем для удобства будут обозначаться ФД1, ФД2 и ФД3.

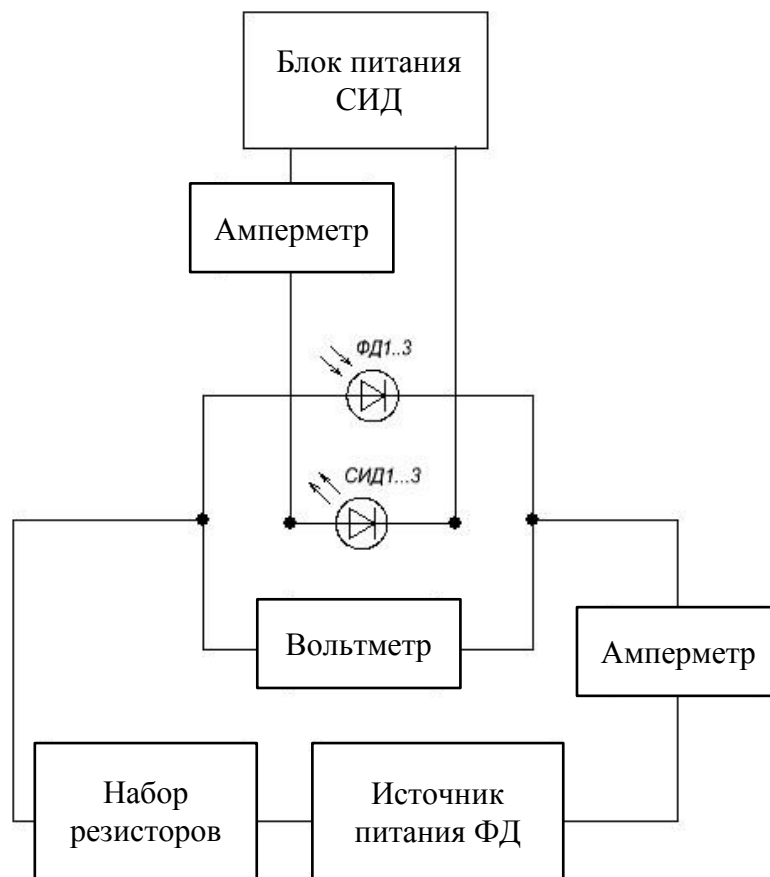


Рис. 4.3. Блок-схема установки для исследования характеристик фотодиодов

На рис. 4.3 изображена блок-схема измерительной установки для исследования характеристик фотодиодов. Установка состоит из трех различных фотодиодов и трех светодиодов, расположенных так, чтобы каждый светодиод освещал свой фотодиод; из источника питания фотодиодов, вольтметра,

служащего для измерения напряжения на фотодиодах, амперметра для измерения тока фотодиодов. Также в установке предусмотрен блок питания светодиодов и амперметр, предназначенный для измерения токов, протекающих через светодиоды.

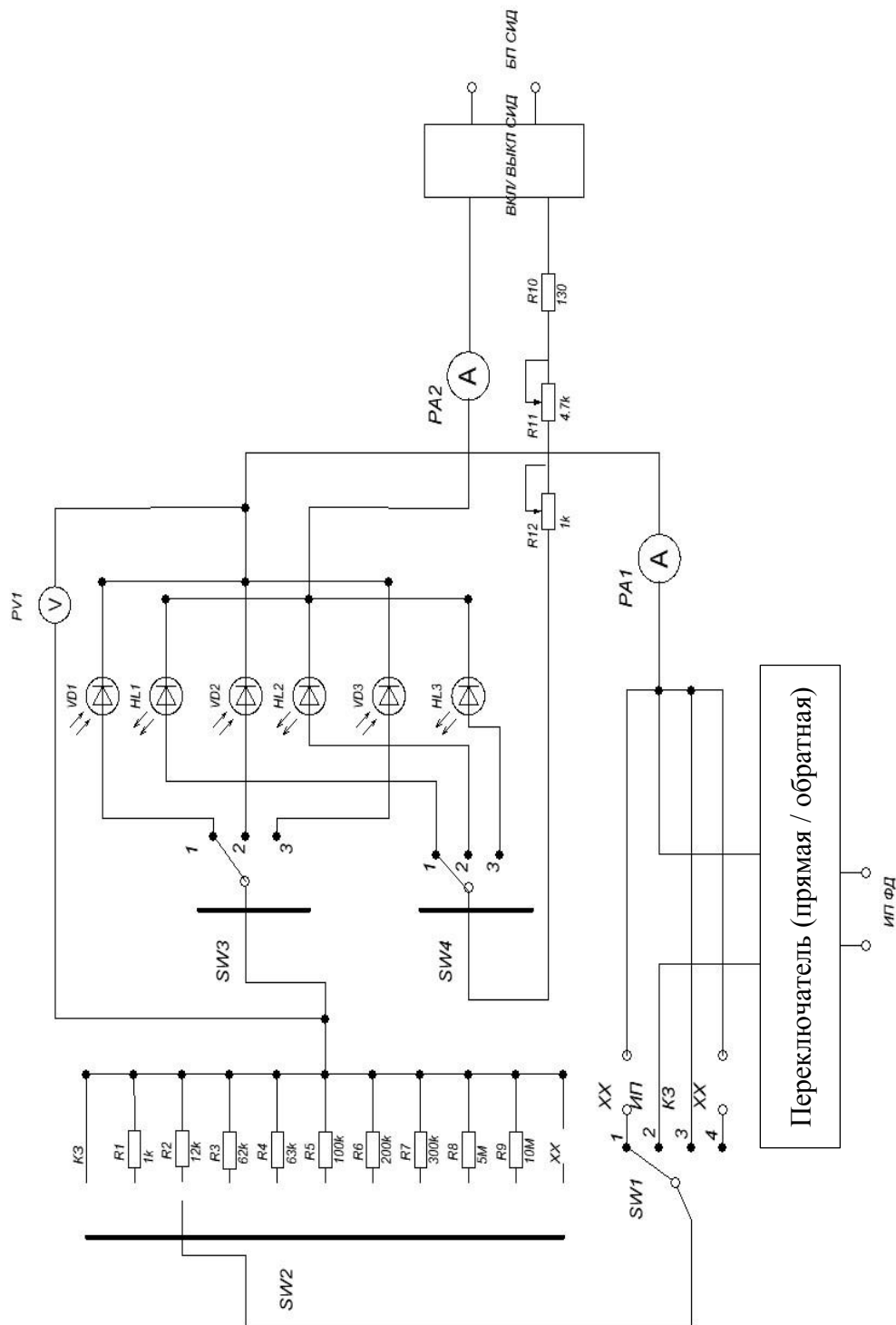


Рис. 4.4. Электрическая схема лабораторного стенда для исследования характеристик фотодиодов

Электрическая схема лабораторной установки представлена на рис. 4.4. Она состоит из двух частей. Первая часть представляет собой схему питания и управления тока на светодиодах. Питание светодиодов осуществляется с помощью блока питания (БП СИД). Управление током осуществляется с помощью переменных резисторов R11 и R12. Изменяя сопротивления резисторов, можно регулировать значение прямого тока, пропускаемого через светодиоды, что в свою очередь влечет за собой изменение мощности испускаемого ими излучения. Ток, протекающий через светодиод, регистрируется с помощью амперметра (РА2).

Вторая часть электрической схемы представляет собой схему питания и регистрации измерений характеристик фотодиода. Питание осуществляется от источника питания фотодиода (ИП ФД). При помощи вольтметра (РV1) и амперметра (РА1) происходит регистрация напряжения и тока в цепи фотодиода.

Переключение режимов работы цепи происходит с помощью ключа SW1. При переключении ключа в 1 и 4 положение происходит размыкание цепи, что соответствует режиму холостого хода (XX), и ток в цепи фотодиодов не протекает. Таким образом, при освещении фотодиода, можно измерить одну из световых характеристик - зависимость напряжения холостого хода от величины светового потока.

При переключении ключа SW1 в положение 2 осуществляется подключение источника питания. При этом в цепи фотодиодов начинает протекать ток. С помощью переключателя «прямая/обратная» можно менять полярность напряжения, которое подается с источника питания на фотодиод. В этом случае на лабораторной установке можно снять «прямую и обратную ветвь» вольт-амперной характеристики, при различных освещенностях фоточувствительного элемента фотодиодов.

Если переключатель SW1 находится в положении 3, цепь замыкается, и в ней протекают токи, вызванные воздействием потока падающего излучения светодиода. При помощи ключа SW2 осуществляется изменение номинала нагрузочных резисторов в цепи фотодиода. Ключи SW3 и SW4 работают синхронно. При переводе ключа SW3 в положение 1, осуществляется включение в цепь фотодиода VD1 и одновременно ключ SW4 включает светодиод HL1. Положение 2 ключей SW3 и SW4 одновременно включает в цепь фотодиод VD2 и светодиод HL2. При переводе ключа SW3 в положение 3 осу-

существляется включение в цепь фотодиода VD3 и одновременно ключ SW4 включает светодиод HL3.

На лицевой панели (рис. 4.5) лабораторного стенда расположены три мультиметра, два из которых предназначены для измерения тока, протекающего через фотодиоды (ТОК ФД), и напряжения, падающего на фотодиодах (напряжение ФД), и один мультиметр служит для измерения тока, протекающего через светодиоды (ТОК СИД), т. е. мультиметры, работающие в режиме измерения тока, играют роль амперметров, которые показаны на электрической схеме установки (рис. 4.4, амперметры PA1 и PA2), а мультиметр, работающий в режиме измерения напряжения, – вольтметра (PV1). Также на лицевой панели присутствует семь переключателей. Три переключателя необходимы для работы светодиодов, с их помощью производится включение и выключение в цепь светодиодов (ВКЛ/ВЫКЛ СИД), а также регулировка светового потока светодиодов, при помощи изменения прямого тока светодиодов с помощью переключателей ТОК ГРУБО и ТОК ТОЧНО, которые соответствуют переменным резисторам R11 и R12 (см. рис. 4.4).

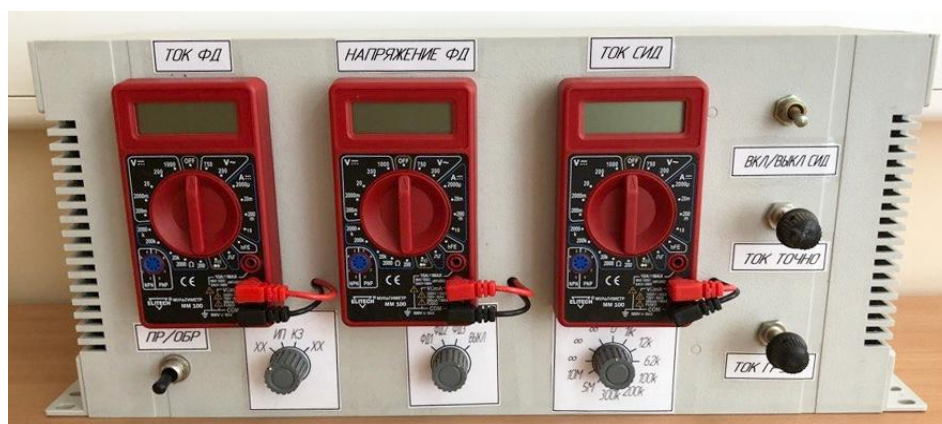


Рис. 4.5. Лицевая панель лабораторного стенда

Оставшиеся четыре переключателя предназначены для изменения параметров в цепи фотодиодов: для изменения полярности подаваемого напряжения от источника питания на фотодиоды (ПР/ОБР), для выбора режима работы фотодиодов (XX, ИП, КЗ), для выбора фотодиодов для исследования (ФД1, ФД2, ФД3) и для изменения номиналов нагрузочных сопротивлений в цепи фотодиодов (R1...R10). Также были нанесены надписи на лицевую панель.

Переключателям параметров в цепи фотодиодов, расположенных на лицевой панели, соответствуют переключатели, изображенные на электриче-

ской схеме лабораторного стенда (см. рис. 4.4). Переключатель SW1 соответствует переключателю (XX, ИП, КЗ), SW2 – (R1...R10), SW3 – (ФД1, ФД2, ФД3), переключатель прямая/обратная – (ПР/ОБР).

### 4.3. Исследование полупроводникового фотодиода.

#### Проведение измерений

При выполнении лабораторной работы необходимо оформить протокол исследований по образцу:

ВАХ ФД 1				
$I_{\text{сид}}, \text{мА}$	0	5	...	25
$U_{\text{ФД}}, \text{В}$	$I_{\text{ФД}}, \text{мА}$	$I_{\text{ФД}}, \text{мА}$	...	$I_{\text{ФД}}, \text{мА}$
-0,6	-0,001	-0,2		-0,8
-0,5	...	...	...	...
...	...	...	...	...
0,5	3	...	...	...
0,6	4	...	...	...

Световые характеристики ФД1			
$I_{\text{сид}}, \text{мА}$	$U_{\text{XX}}$	$I_{\text{КЗ}} (R_{\text{н}} = 0)$	$I_{\text{КЗ}} (R_{\text{н}} = 12 \text{ кОм})$
0	...	...	...
5	...	...	...
...	...	...	...
25	...	...	...

Нагрузочная характеристика ФД1				
$R_{\text{н}}$	0	12	...	$\infty$
$U_{\text{ФД}}, \text{В}$				
$I_{\text{ФД}}, \text{мА}$				

Выполнили:

гр. 0000

Ф.И.О.

Выполнение лабораторной работы необходимо осуществлять по следующему алгоритму.

1. Перед началом работы необходимо убедиться, что переключатели на стенде находятся в положении «ВЫКЛ», «XX» и «ВЫКЛ СИД». Включение и выключение блока питания фотодиодов следует производить только при таком положении переключателей.



2. В работе используется источник питания, который может обеспечить широкий диапазон токов и напряжений, значительно превосходящий значения, допустимые для исследуемых фотодиодов. Для того чтобы избежать поломки лабораторного стенда, необходимо при регулировке напряжения использовать только ручки «FINE» («ТОЧНО») на блоке питания фотодиодов.

3. Включить мультиметры. Ручку мультиметра «Ток СИД» переключить в положение измерения постоянного тока с пределом 200 мА, ручку мультиметра «Напряжение фотодиодов» установить в положение измерения постоянного напряжения с пределом 20 В, мультиметр «Ток фотодиодов» переключить в положение измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

4. Убедившись, что ручки регулирования напряжений на блоке питания фотодиодов (GPS-3030DD) находятся в крайнем левом положении, включите блок питания. После включения необходимо удостовериться, что работа блока питания осуществляется в режиме стабилизации по напряжению, т. е. горит зеленый индикатор на блоке. Значение задаваемого напряжения на блоке питания не является истинным, напряжение следует контролировать на мультиметре, показывающем напряжение на фотодиодах. Значение напряжения не должно превышать 1 В.

5. Уточнить у преподавателя, какой из фотодиодов будет исследоваться.

6. Исследовать вольт-амперные характеристики фотодиода без освещения. Для этого установить переключатель «ВКЛ/ВЫКЛ СИД» в положение «ВЫКЛ» (вниз). Установить левый круглый переключатель на стенде в положение «ИП». Также необходимо убедиться, что значение нагрузочного сопротивления фотодиода  $R_n = 0$  Ом. Произвести измерения обратной ветви ВАХ фотодиода, установив штырьковый переключатель в режим «ОБР», изменяя напряжение на источнике питания в диапазоне от -0,6 до 0 В через 0,1 В. Значение напряжения следует контролировать по мультиметру «НАПРЯЖЕНИЕ ФД». Уменьшив напряжение питания до нуля, следует поменять полярность питания переключением в положение «ПР» и измерить прямую ветвь ВАХ. Для ФД1 и ФД2 измерения следует проводить в диапазоне от 0 до 0,6 В через 0,1 В, а для ФД3 – от 0 до 1 В через 0,1 В. Следует контролировать изменение полярности напряжения и тока.

7. При исследовании влияния на ВАХ освещенности фоточувствительной площадки следует установить переключатель «ВКЛ/ВЫКЛ СИД» в положение «ВКЛ». Изменяя ток в цепи светодиодов при помощи ручек «ТОК ГРУБО» и «ТОК ТОЧНО» от 5 мА до 25 мА через 5 мА, при каждом значе-

нии тока измерить ВАХ аналогично пункту 6. В итоге необходимо получить набор ВАХ ( $I_{\text{ФД}} = f(U_{\text{ФД}})$ ) при разных освещенностях ( $I_{\text{СИД}}$ ).

8. Исследовать световую характеристику – зависимость напряжения холостого хода  $U_{\text{ХХ}}$  от величины светового потока при тех же значениях тока, протекающего через светодиод, что и в пункте 7. Для измерения напряжения холостого хода необходимо, чтобы значение нагрузочного сопротивления  $R_{\text{н}} = \infty$  и ток в цепи не протекал. Для этого необходимо переключить регулятор стенда в положение «ХХ», а регулятор сопротивления – в положение  $R_{\text{н}} = \infty$ .

9. Измерить световую характеристику фотодиода  $I_{\text{Ф}} = f(\Phi)$  в вентильном режиме работы при значениях нагрузочного сопротивления  $R_{\text{н}} = 0$  и  $R_{\text{н}} = 12$  кОм. Для этого необходимо перевести регулятор на стенде в положение КЗ. Значение тока на светодиоде изменять от 0 до 25 мА через каждые 5 мА.

10. Для исследования нагрузочных характеристик фотодиода, необходимо установить ток светодиода равным 20 мА и изменять сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  от минимального до максимального. При каждом значении нагрузки следует измерять ток и напряжение на фотодиоде (режим КЗ).

11. Выключить СИД.

12. Регуляторы для выбора фотодиодов переключить в положение «ВЫКЛ» и ХХ.

13. Выключить источник питания.

#### **4.4. Обработка результатов и содержание отчета**

Отчет должен содержать следующее.

1. Цель работы.
2. Блок-схему измерительной установки.
3. Принципиальные электрические схемы для каждого типа измерений.
4. Вольт-амперные характеристики фотодиода, измеренные без освещения и при различных освещенностях, изображенные на одном графике.
5. Световые и нагрузочные характеристики фотодиода.
6. Результаты определения из ВАХ фотодиода квантового выхода с использованием (4.6). Мощность излучения светодиода считать равной 2 мВт, а длину волны – 720 нм. Расчеты проводить только для максимальной освещенности.
7. Расчет чувствительности фотодиода с использованием (4.7).

8. Расчет величины  $I_S$  из выражения (4.3) с использованием экспериментальных значений  $U_{xx}$  и  $I_{kз}$  при одинаковых значениях светового потока. Сравнить полученное значение с величиной  $I_S$ , полученной из вольтамперной характеристики неосвещенного фотодиода.

9. Результаты определения из нагрузочных характеристик значения  $R_H$ , при котором мощность фотодиода в вентильном режиме работы будет максимальной.

10. Выводы с подробным описанием каждой полученной характеристики.

#### 4.5. Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы работы фотодиодов?
2. Чем определяется спектральная чувствительность фотодиода?
3. Чем различаются вентильный и фотодиодный режимы работы фотодиода?
4. Какую максимальную мощность, снимаемую с фотодиода, можно получить в вентильном режиме работы?
5. Пояснить влияние изменения сопротивления нагрузки на фотоэлектрические характеристики фотодиода.
6. Какие физические явления определяют инерционные свойства фотодиодов?
7. Как влияют сопротивление нагрузки и величина напряжения, приложенного к фотодиоду, на инерционные свойства фотодиода?
8. Указать основные области применения полупроводниковых фотодиодов.
9. Что такое *p-i-n*-фотодиоды и лавинные фотодиоды? В чем их преимущества и недостатки?
10. Какие фотоприемники используются в волоконно-оптических линиях связи?

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Луизов А. В. Цвет и свет.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Панов М. Ф., Соломонов А. В. Физические основы фотоники: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018.
3. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высш. шк., 2012.
4. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника / пер. с фр. М.: Техносфера, 2004.
5. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ., 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ RGB-СВЕТОДИОДА .....	3
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.....	22
Лабораторная работа № 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ГЕТЕРОЛАЗЕР .....	31
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОДИОДОВ.....	48
Список рекомендуемой литературы.....	61

Ламкин Иван Анатольевич  
Тарасов Сергей Анатольевич  
Пихтин Александр Николаевич

**Основы фотоники**  
Лабораторный практикум

Редактор М. Б. Шишкова

---

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,0.  
Гарнитура «Times New Roman». Тираж 105 экз. Заказ .

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5