

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



**ФКЛ-21**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ  
ПОЛУПРОВОДНИКА ПО ФОТОЭМИССИИ.**

Тула, 2014 г.

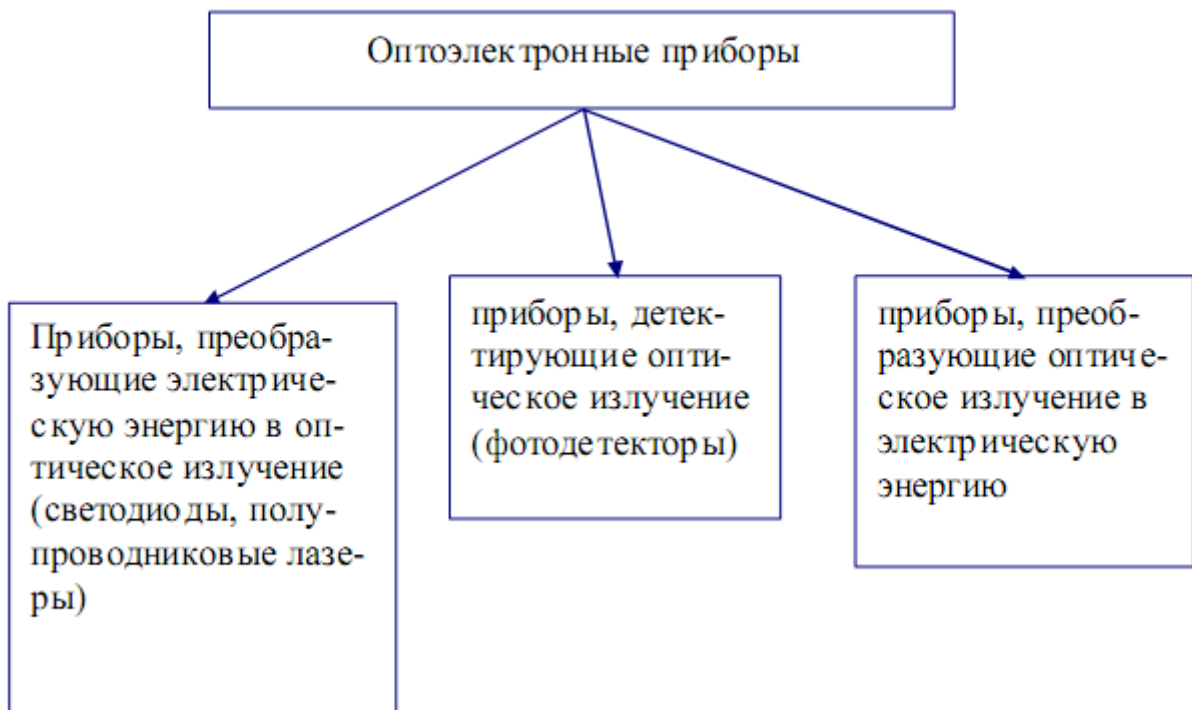
# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА ПО ФОТОЭМИССИИ.

Цель работы: получить с помощью дифракционного монохроматора профиль эмиссионной линии излучения полупроводниковых образцов (светодиодов). Ознакомится с явлением фотоэмиссии и рассчитать ширину запрещенной зоны эмиссионного участка полупроводника.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Общие о полупроводниковых оптических генераторах.



К оптоэлектронным приборам относятся приборы, в которых основные процессы протекают с участием квантов света – фотонов.

Светодиоды, полупроводниковые лазеры принадлежат к классу люминесцентных приборов. Люминесценцией называется оптическое излучение, возникающее в результате электронного возбуждения материала (имеющее неравновесную природу).

Мы будем рассматривать электролюминесценцию и, прежде всего, инжекционную электролюминесценцию, которая представляет собой оптическое излучение, возникающее при инжекции неосновных носителей заряда в области полупроводникового р-п перехода, где имеют место излучательные переходы. Основные переходы в полупроводнике показаны на рис. 1.

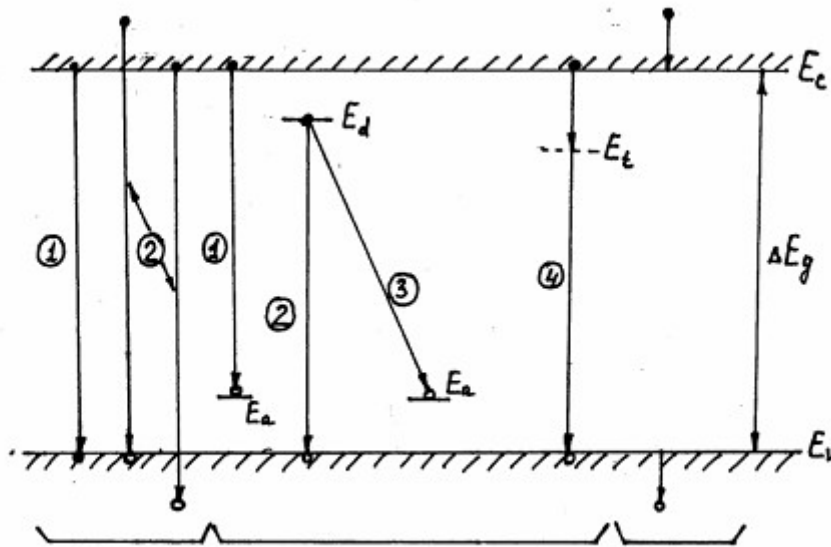


Рис. 1. Основные переходы в полупроводнике.

Переходы можно классифицировать следующим образом:

I – межзонные переходы, вызывающие:

- 1) – собственное излучение с энергией близкой к  $\Delta E_g$ , которое может сопровождаться возбуждением фотонов или экситонов;
- 2) – излучение с более высокой энергией с участием «горячих» носителей, которое может быть связано, например, с лавинным пробоем.

II – переходы с участием химических примесей или физических дефектов:

- 1) –  $E_c$  и  $E_a$ ;
- 2) –  $E_d$  и  $E_v$ ;
- 3) –  $E_d$  и  $E_a$ ; (межпримесное излучение);
- 4) – через «глубокие» уровни.

III – внутрizonные переходы, которые вызывают излучение, иногда называемое тормозным, и которые протекают с участием «горячих» носителей.

Не все переходы могут возникать в одном и том же материале и при одних и тех же условиях, и не все из них являются излучательными. Эффективным с точки зрения люминесценции является такой материал, в котором излучательные переходы превалируют над безизлучательными.

### Спектры излучения светодиодов.

Существуют три типа взаимодействия между фотонами и электронами в твердом теле:

1. Фотон может поглотиться в результате перехода электрона из заполненного состояния V-зоны в свободное состояние EC.
2. Фотон может стимулировать излучение подобного себе фотона, вызывая переход электрона из заполненного состояния C-зоны на свободные состояния V-зоны.

### 3. Спонтанные обратные переходы электронов из С-зоны на свободные состояния V-зоны.

В основе теории оптических межзонных переходов лежит так называемое правило К – отбора.  $K_1$  – волновой вектор волновой функции V-зоны,  $K_2$  – волновой вектор волновой функции С – зоны, должны различаться на волновой вектор фотона, т. е.  $\langle M \rangle = 0$  ( $\langle M \rangle$  - матричный элемент перехода).

Поскольку волновой вектор электрона превосходит волновой вектор фотона, правило К-отбора записывают, обычно, в виде равенства:

$$\vec{K}_1 = \vec{K}_2. \quad (1.1)$$

Разрешенными являются переходы, при которых начальное и конечное состояния характеризуются одинаковыми волновыми векторами. Такие переходы называют «прямыми» или «вертикальными».

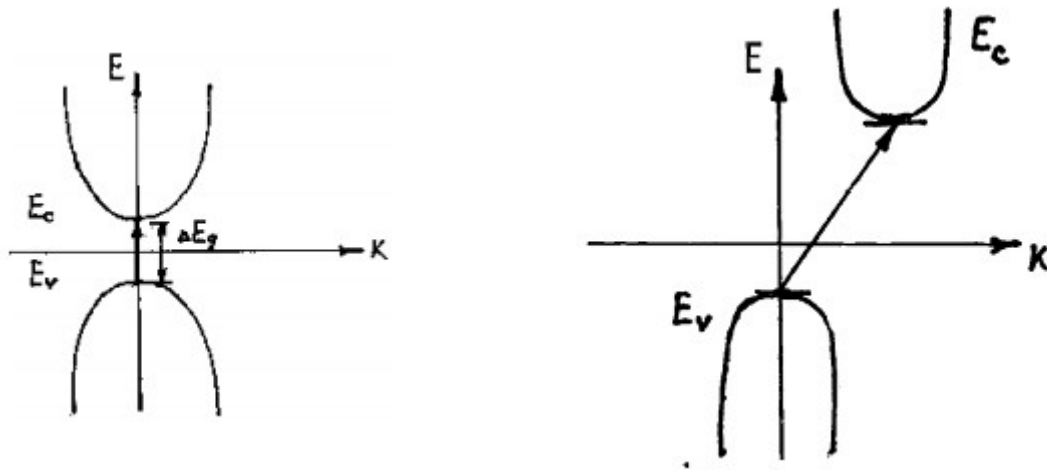


Рис. 2. Схематическое изображение переходов в полупроводниковом светодиоде.

Возможна ситуация с излучением фонона и с его поглощением.

Введение в полупроводник примесей приводит к возмущению волновых функций и матричных элементов перехода, вследствие чего правило К-отбора не выполняется. Поэтому в обычно рассмотренных случаях наблюдаются «запрещенные» переходы, и матричный элемент зависит от энергии фотона.

#### Эффективность люминесценции.

При заданной энергии возбуждения наряду с излучательной рекомбинацией протекают конкурирующие безизлучательные процессы. Квантовая эффективность люминесценции определяется как отношение числа возбужденных носителей, дающих вклад в излучение, к полному числу носителей, участвующих в рекомбинации, и может быть выражена как:

$$\eta_q = \frac{R_r}{R} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}, \quad (1.2)$$

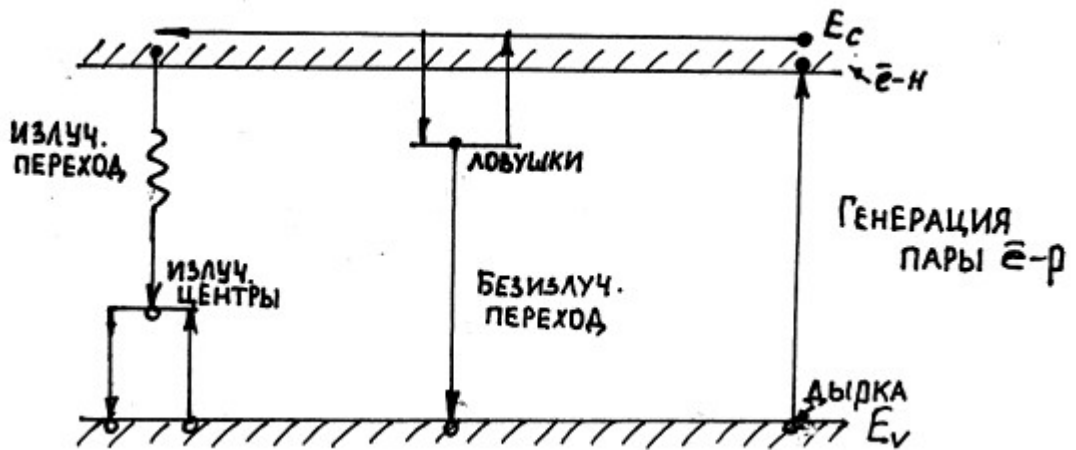


Рис. 3. Схематическое изображение излучательных и безизлучательных переходов.

где  $\tau_r$  и  $\tau_{nr}$  – времена жизни излучательной и безизлучательной рекомбинации соответственно, а  $R_r$  и  $R$  – скорости излучательной и полной рекомбинации.

Для полупроводниковых слоев р-типа скорость рекомбинации и время жизни связаны соотношением:

$$R = (n - n_0) / \tau, \quad (1.3)$$

Аналогично для слоев n-типа:

$$R = (p - p_0) / \tau, \quad (1.4)$$

где  $n_0$  и  $p_0$  – равновесная концентрация электронов и дырок, а  $n$  и  $p$  – электронная и дырочная концентрации при оптическом возбуждении.

Время жизни  $\tau$  неосновных носителей дается выражением:

$$\tau = \frac{\tau_r \cdot \tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}. \quad (1.5)$$

Из (1.2) видно, что для обеспечения высокой квантовой эффективности время жизни должно быть мало.

Эффективность является функцией температуры – с увеличением температуры эффективность уменьшается (смотрите график рис. 4).

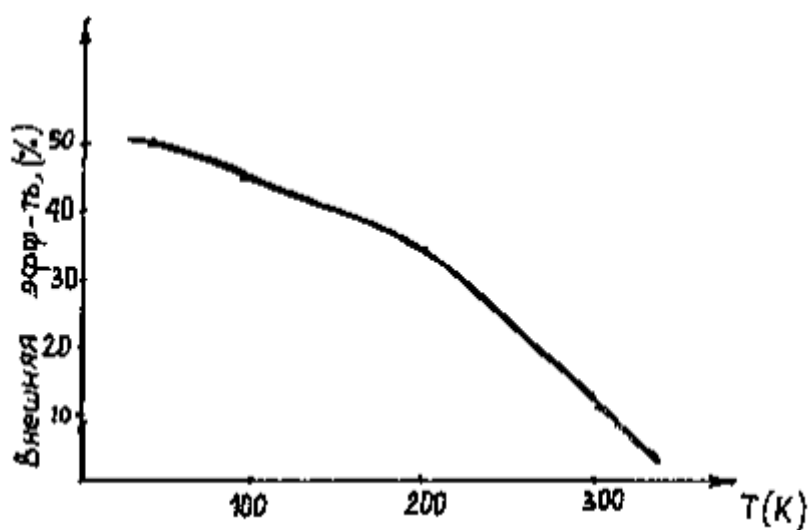


Рис. 4. Зависимость внешней эффективности квантового выхода от температуры.

### Методы возбуждения электролюминесценции.

К способам, которыми можно возбуждать электролюминесценцию, относятся:

- 1) межзонное (собственное) возбуждение;
- 2) лавинное возбуждение;
- 3) возбуждение при туннелировании и инжекции.

Межзонное возбуждение обеспечивается при воздействии переменного электрического поля на порошкообразный полупроводник, впрессованный в диэлектрик (пластмассу или стекло). Электролюминесценция имеет место при звуковых частотах. Ее эффективность мала ( $<1\%$ ). Основными механизмами при этом является ударная ионизация ускоренных электронов или полевая эмиссия электронов с ловушек.

Лавинное возбуждение достигается смещением р-п перехода или контакта металл-полупроводник (диод Шоттки) в обратном направлении в область лавинного пробоя (рис. 5). Электронно-дырочные пары, возникающие при ударной ионизации, могут вызвать излучение за счет межзонных (лавинное излучение) и внутризонных (тормозное излучение) переходов. Электролюминесценция может быть также результатом туннелирования в область прямо-смещенного и обратно-смещенного диода (перехода). Это наиболее важный метод возбуждения электролюминесценции. При прямом смещении на р-п-переходе инжекция неосновных носителей может привести к эффективной излучательной рекомбинации, т. к. в этом случае электрическая энергия непосредственно преобразуется в фотоны.

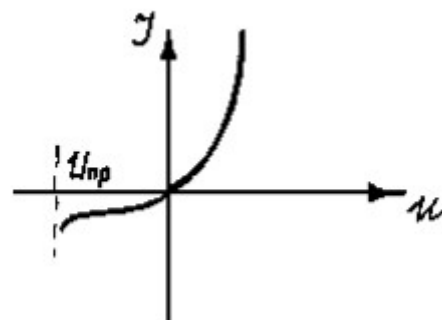


Рис. 5. Вольтамперная характеристика образца при лавинном возбуждении.

### Светодиоды видимого диапазона. Основные характеристики.

Светодиоды – это p-n-переходы, которые при прямом смещении могут испускать спонтанное излучение в ультрафиолетовой (УФ), видимой и инфракрасной (ИК) областях электромагнитного спектра.

Поскольку глаз чувствителен только к свету с энергией  $h\nu \geq 1,8$  эВ ( $\sim 0,7$  мкм и до  $\sim 0,4$  мкм), то полупроводники, которые могут быть использованы для создания светодиодов видимого диапазона, должны иметь ширину запрещенной зоны  $\Delta E_g$  больше этого значения. Это Материалы группы: GaAs, GaP и т. д., а также твердые растворы типа  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ , где  $0 < x < 1$ ; также используются материалы CdS, ZnS, ZnSe и т. д.

Основным энергетическим параметром полупроводникового светоизлучающего p-n перехода является внутренний квантовый выход – отношение числа излученных фотонов к числу рекомбинированных пар носителей:

$$\eta_{\text{внутр}} = \frac{N_{\Phi}}{N_{\text{нар}}} . \quad (1.6)$$

В идеале  $\eta_{\text{внутр}} = 100\%$ , но из-за наличия безизлучательных переходов реально он меньше (и значительно).

Наилучшими с точки зрения  $\eta_{\text{внутр}}$  являются светодиоды из GaAs ( $\eta_{\text{внутр}}$  близок к 100%). В светодиодах на основе других материалов  $\eta_{\text{внутр}}$  меньше значительно, но и при таких значениях этого достаточно для практического использования. Аналогично  $\eta_{\text{внутр}}$  определяется и внешний квантовый выход  $\eta_{\text{внешн}}$ .

Внешний квантовый выход – отношение числа фотонов, вышедших из светодиода, к числу излученных фотонов:

$$\eta_{\text{внешн}} = \frac{N}{N_{\Phi}} . \quad (1.7)$$

**Яркость излучения (В).** В системе Си единица измерения яркости  $\frac{\text{Кд}}{\text{м}^2}$  (кандела на квадратный метр).

Это яркость источника излучения, каждый квадратный метр излучающей поверхности которого имеет в данном направлении силу света, равную одной канделе.

$$B = \frac{\Delta I}{\Delta S \cos \varphi} , \quad (1.8)$$

где  $\varphi$  – угол между нормалью к излучающей поверхности  $\Delta S$  и направлением, по которому дифференцируется сила света  $I$ .

Для глаза вводится понятие видности:

$$V = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (1.9)$$

где  $\Phi$  – световой поток (то есть оцениваемый нашим глазом);  $\Phi_0$  – полный световой поток.

Единицей измерения видности в системе СИ:  $[V] = [\text{Лм/Вт}]$  (люмен на ватт).  $V$  – величина, позволяющая переходить от световых величин к энергетическим.

Глаз человека по-разному реагирует на излучения разных длин волн (спектральная чувствительность глаза см. рис. 6).

Как видно из графика, максимальная видность наблюдается при  $\lambda = 554$  нм (зелено-желтая область) и составляет 683 Лм/Вт.

Излучающий прибор, который всю свою энергию отдает в виде излучения с  $\lambda = 554$  нм, обладает наибольшей яркостью и экономичностью при использовании светодиодов для визуального отображения информации.

Однако область применения светодиодов широка, и в ряде случаев (например запись информации, передача светового сигнала и т. д.), яркость не является основным параметром светодиода.

### Яркостная характеристика.

Светодиод, р-n-переход которого включен в прямом направлении, обладает относительно малым сопротивлением. Поэтому светодиоды следует считать токовыми приборами, питаемыми от генераторов тока. Зависимость яркости от проходящего через светодиод ток представлена на рис. 7.

Вид характеристики дифференцируется структурой р-n-перехода и зависит от слоя или места, в котором происходит рекомбинация носителей (р-n - переход, сильнолегированная или слаболегированная область, прилегающая к р-n-переходу).

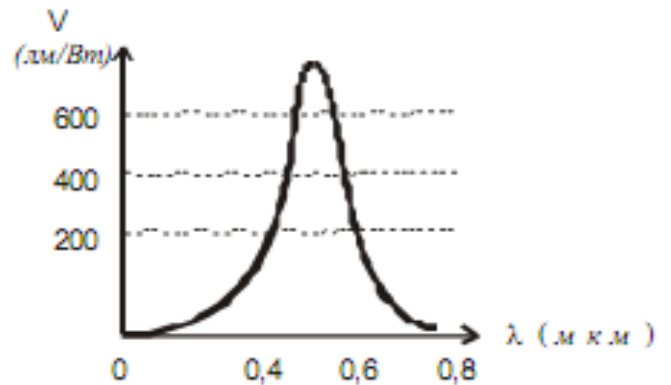


Рис. 6. Яркостная характеристика светодиода, субъективно воспринимаемая человеческим глазом (видность) в зависимости от длины волны излучения.

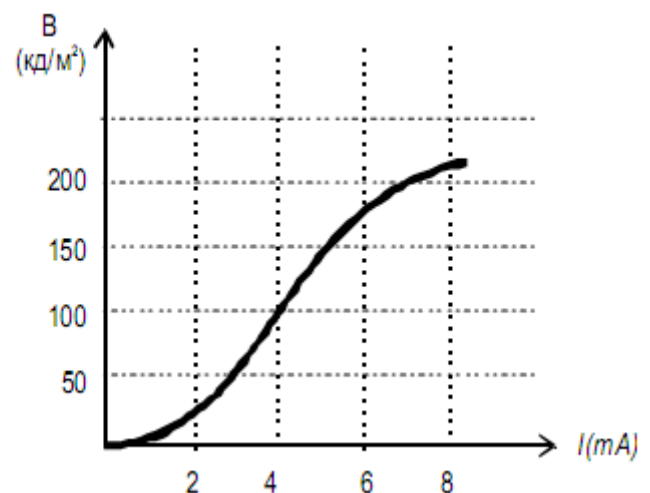


Рис. 7. Зависимость яркости излучения светодиода от тока р-n перехода.



Важное значение имеет спектральная характеристика светодиода. Т. е. зависимость интенсивности излучения от длины волны испускаемого света рис. 8.

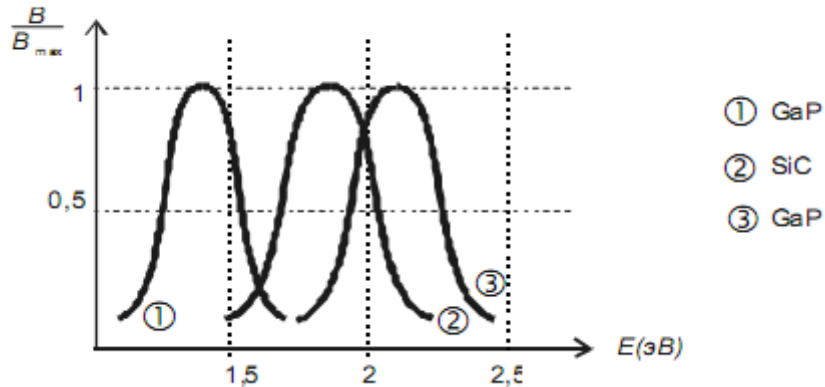


Рис. 8. Спектральные характеристики светодиодов, изготовленных из различных материалов.

Вольтамперная характеристика светодиода аналогична ВАХ обычной диодной структуры р-п перехода рис. 9.

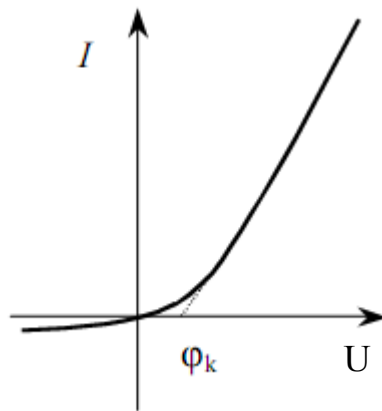


Рис. 9. Идеализированная ВАХ светодиода.  $\varphi_k$  - контактная разность потенциалов р-п перехода, отождествляемая с «напряжением включения» светодиода, определяемая как точка пересечения продолжения линейного участка ВАХ с осью  $U$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

### Методика проведения эксперимента.

Светоизлучающий диод (светодиод) – полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию оптического диапазона. Его работа основана на явлении инжекционной электролюминесценции, происходящей в полупроводниковом кристалле с электронно-дырочным переходом.

Излучение светодиодов некогерентно. Инжекцией носителей заряда называется введение носителей заряда через пониженный под действием прямого напряжения потенциальный барьер в область, где эти носители являются неосновными.

Равновесное распределение электронов и дырок в зонах полупроводника поддерживается двумя непрерывными процессами: генерацией свободных носителей заряда и их рекомбинацией.

**Процессом рекомбинации** называется возвращение электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате чего исчезает пара носителей заряда.

Образование свободных электронов и дырок называется **процессом генерации носителей заряда**. Генерация происходит при воздействии теплового хаотического движения атомов кристаллической решетки (тепловая генерация), при воздействии поглощенных полупроводником квантов света (световая генерация) и других энергетических факторов. Так как полупроводник всегда находится под действием всех этих факторов или хотя бы одного ( $T \neq 0$ ), генерация носителей происходит непрерывно.



Рис. 2.1. Излучение при рекомбинации.

**Процесс рекомбинации** заключается в том, что электрон зоны проводимости занимает вакантное место в валентной зоне, при этом исчезают два носителя заряда – электрон и дырка. На генерацию носителей затрачивается энергия (тепловая, электрическая или световая), которая выделяется в процессе рекомбинации.

Освобожденная энергия может быть полностью передана узлам кристаллической решетки в виде тепла и акустических колебаний – фононов. В этом случае говорят о безызлучательных переходах электронов из зоны проводимости в валентную зону.

Если переход сопровождается излучением кванта  $h\nu = \Delta E$ , то процесс называют излучательной рекомбинацией рис. 2.1. Такой процесс требует выполнения законов сохранения энергии и импульса. Закон сохранения энергии выполняется автоматически  $h\nu = \Delta E$ , но из-за малой величины импульса фотона закон сохранения импульса требует, чтобы импульс электрона в зоне

проводимости практически равнялся его импульсу при переходе в валентную зону. Такое соотношение выполняется только для, так называемых, прямозонных полупроводников, в результате чего в них вероятность излучательной рекомбинации превосходит вероятность безызлучательных переходов.

При равновесном распределении носителей зарядов число излучательных переходов электронов вниз равно числу переходов вверх, совершаемых за счет квантов света, то есть фотоны за пределы полупроводника не выходят.

Нарушение равновесного распределения приводит к появлению избыточных носителей заряда (внутреннему фотоэффекту) или избыточных фотонов (люминесценции).

Вероятность рекомбинации пропорциональна числу электронов в зоне проводимости, поэтому для возбуждения ощутимой люминесценции необходимо создать ярко выраженное неравновесное распределение носителей заряда. Для этой цели используется контакт двух примесных прямозонных полупроводников, легированных до вырождения.

Контактная разность потенциалов  $U_0$  такого p-n -перехода пропорциональна ширине запрещенной зоны  $\Delta E$  :

$$U_0 \approx \frac{\Delta E}{e} \quad (2.1)$$

При подключении к p-n -переходу внешнего напряжения в прямом направлении ( $U > U_0$ ) в область p будут инжектироваться электроны, в результате чего концентрация свободных электронов станет выше равновесной, и вероятность излучательной рекомбинации возрастет.

При малых токах (единицы миллиампер) в контакте возникает излучательная рекомбинация спонтанного характера. Спонтанное излучение характерно для люминесцентных диодов, которые называются светодиодами. Схема устройства светодиода и его включения в электрическую цепь показана на рис. 2.2. Особенностью светодиодов является то, что они изготавливаются на основе p-n -перехода между вырожденными прямозонными полупроводниками. Прямое напряжение, подключаемое к светодиоду, с учетом (2.1) определяется соотношением:

$$U \geq \frac{h\nu}{e} \quad (2.2)$$

где  $h\nu = \Delta E$  - энергия излучаемого кванта.

Часть электронов, инжектируемых внешним полем в p-область светодиода, рекомбинирует безызлучательно. Кроме того, часть фотонов испытывает полное внутреннее отражение на границе полупроводника.

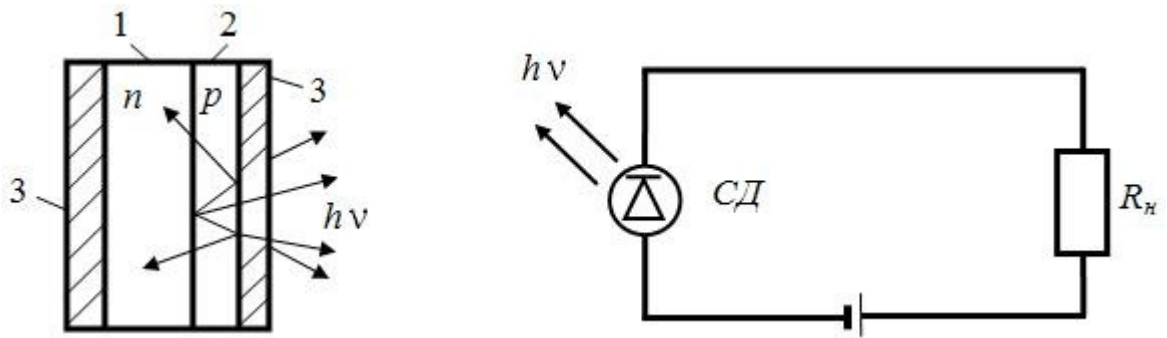


Рис. 2.2. Схема устройства и включения светодиода:

1 – полупроводник n-типа; 2 – полупроводник p-типа; 3 – контакты.

Поэтому число излучаемых в единицу времени светодиодом фотонов  $N_\phi$  значительно меньше количества инжектируемых электронов  $N_e$ . Отношение  $\frac{N_\phi}{N_e}$ , называемое внешним квантовым выходом, может быть определено по формуле:

$$\frac{N_\phi}{N_e} = \frac{\Phi_c \cdot e}{h \nu I_{cd}} \quad (2.3)$$

где  $\Phi_c$  – световая мощность светодиода;  $I_{cd}$  – сила тока, протекающего через светодиод.

Соотношение (2.3) указывает на возможность управления излучаемой мощностью  $\Phi_c$  с помощью величины силы тока, пропускаемого через светодиод.

Это позволяет использовать светодиоды в системах оптической связи, а также в качестве составных частей нового класса приборов – оптронах.

Оптрона представляют собой объединенные в один функциональный блок излучатель (светодиод, лампа накаливания) и фотоэлемент (фотосопротивление, фотодиод, фототранзистор и т. д.). Благодаря тому, что сигнал в оптроне передается с помощью света, эти приборы позволяют осуществить полную электрическую развязку между узлами электронных схем.

Если концентрация электронов в n-области больше, чем концентрация дырок в p-области т. е.  $n_n > p_p$ , то при прямом напряжении происходит инжекция электронов из n-области в p-область.

Инжектированные электроны рекомбинируют с основными носителями, в данном случае с дырками p-области. Рекомбинирующие электроны переходят с более высоких энергетических уровней зоны проводимости, близких к ее нижней границе, на более низкие уровни, расположенные вблизи

верхней границы валентной зоны (рис. 2.1). При этом выделяется фотон, энергия которого почти равна ширине запрещенной зоны  $\Delta W \approx \Delta E$  (рис. 2.1):

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_m} \approx \Delta E. \quad (2.4)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $\lambda_m$  – длина волны, при которой интенсивность излучения максимальна.

Германий и кремний не используются в светодиодах, так как у них ширина запрещенной зоны слишком мала. Для современных светодиодов применяют главным образом фосфид галлия GaP и карбид кремния SiC, а также некоторые тройные соединения, называемые твердыми растворами, состоящие из галлия, алюминия и мышьяка (GaAlAs) или галлия, мышьяка и фосфора (GaAsP) и других соединений. Внесение в полупроводник

некоторых примесей позволяет получить свечение различного цвета. Помимо светодиодов, дающих видимое свечение, выпускаются светодиоды инфракрасного (ИК) излучения, изготавливаемые преимущественно из арсенида галлия GaAs. Они применяются в фотореле и различных датчиках.

Ширина спектра излучения (рис. 2.3) – это величина, определяющая степень монохроматичности излучения квантовых систем. Обычно под шириной спектральной линии подразумевают расстояние между точками ее контура (на графике –  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ), соответствующими интенсивности, равной половине максимальной. Эту величину иногда называют «полушириной линии». По значению полуширины линии можно оценить погрешность определения ширины запрещенной зоны:

$$\Delta(\Delta E) = \frac{hc}{2} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (2.5)$$

Светодиоды обычно имеют ширину спектра в интервале от 10 до 50 нм.

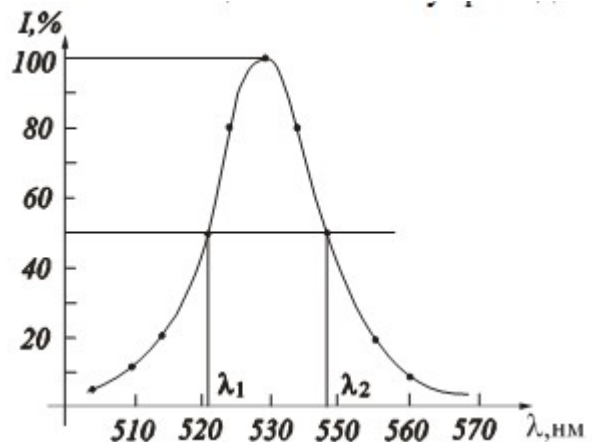


Рис. 2.3. Определение ширины спектра излучения светодиода.

### Приборы и оборудование.

Лабораторная работа выполняется на учебном комплексе ФКЛ-21. Установка состоит из монохроматора-спектрофотометра, блока питания светодиодов (ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ), блока измерения интенсивности фотоэмиссии, состоящего из фотодиода, размещенного на выходной щели монохроматора в кюветном отделении, миллиамперметра с вмонтированной измерительной схемой, размещённого на верхней части корпуса блока управления. Образцы светодиодов закреплены напротив входной щели монохроматора внутри корпуса спектрофотометра.

Принципиальная электрическая схема блока управления представлена на рис. 3.1.

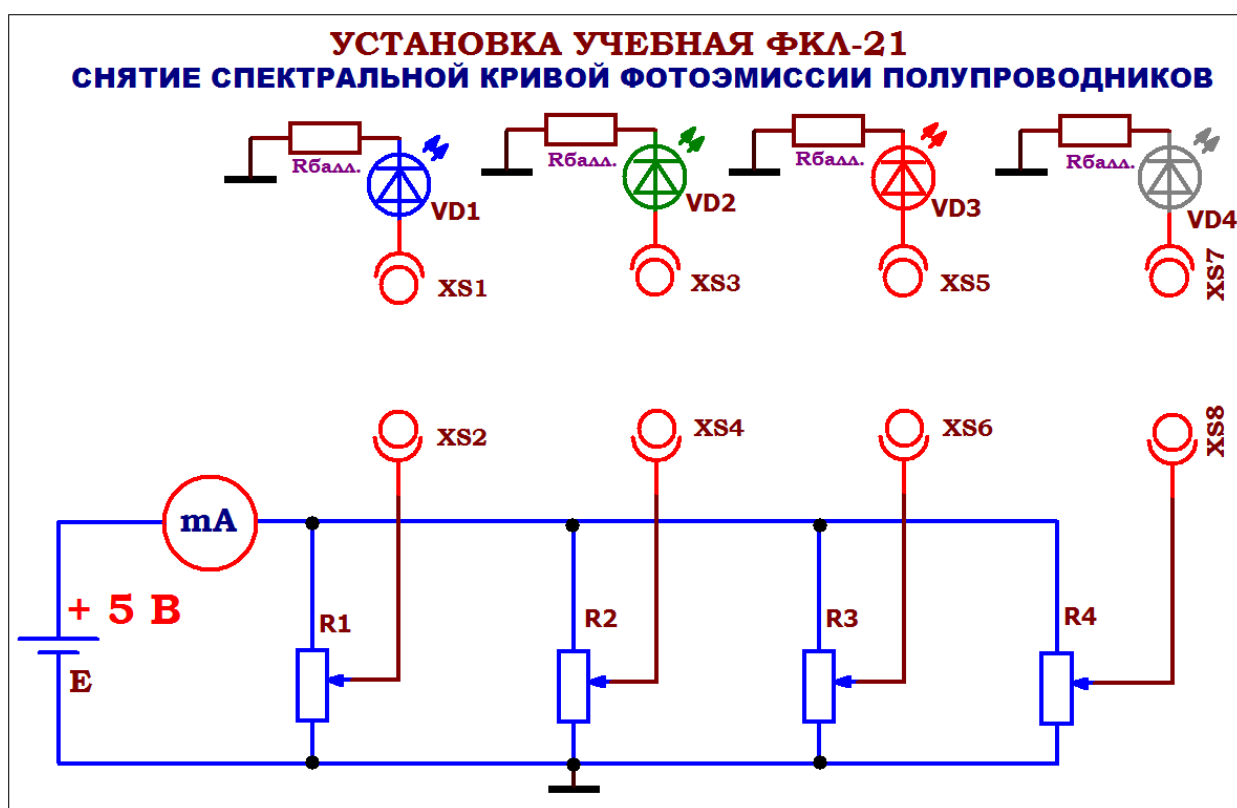


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема для изучения процесса фотоэмиссии полупроводников.

Выбор образца полупроводника (светодиода) для исследования осуществляется подключением его в схему с помощью переключки типа «тюльпан — тюльпан». Светодиод питается от регулируемого источника напряжения +5 В. Для регулировки тока каждого светодиода используются соответствующие ручки R1 – R4, при этом, во избежание превышения допустимого тока, последовательно с каждым образцом включено балластное сопротивление R<sub>балл.</sub>

В качестве монохроматора в данной лабораторной установке используется монохроматор типа МУМ-М(А), входящий в состав спектрофотометрического комплекса ПЭ-5300.

Спектрофотометр ПЭ-5300В представляет собой стационарный настольный лабораторный прибор, состоящий из оптико-механического и электронного узлов, установленных в корпусе. В приборе используется монохроматор с дифракционной решеткой. Вывод результатов измерений осуществляется на многострочный графический дисплей.

Основные технические характеристики оптического прибора приведены в таблице.

Таблица 1.

Наименование параметра	Значение
Спектральный диапазон, нм	от 325 до 1000
Диапазон измерений спектральных коэффициентов направленного пропускания, %Т	от 0,0 до 100,0
Диапазон показаний спектральных коэффициентов направленного пропускания, %Т	от 0,0 до 200,0
Диапазон измерений оптической плотности, Б	от 3,000 до 0,000
Диапазон показаний оптической плотности, Б	от 3,000 до - 0,300
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении спектральных коэффициентов направленного пропускания, %Т	$\pm 0,5$
Пересчёт погрешности при измерении оптической плотности	$\Delta A = 0,43 \cdot \Delta T \cdot 10^{A-2}$
Выделяемый спектральный интервал, нм	4
Уровень рассеянного света	$\leq 0,3\%T$ на 340нм
Оптическая схема	однолучевая
Габаритные размеры, (Д x Ш x В), не более, мм	440x320x175
Масса, не более, кг	8,5
Средний срок службы, лет	8

Функциональная схема спектрофотометра приведена на рис. 3.2.

Спектрофотометр состоит из следующих основных частей (рис.3.2):

1. источник света (в обычном режиме - галогенная лампа);
2. монохроматор МУМ-М(А) для выделения спектрального диапазона требуемых длин волн;
3. кюветное отделение, служащее для размещения проб и калибровочных растворов;

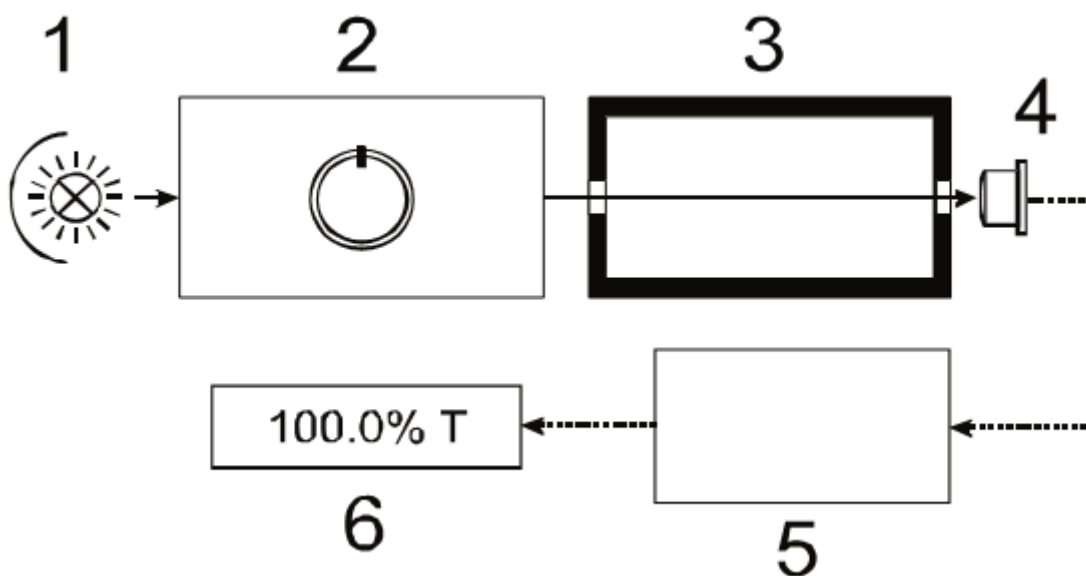


Рис. 3.2. Функциональная схема спектрофотометра.

4. детектор для регистрации света и преобразования его в электрический сигнал;

5. электроника, обеспечивающая проведение измерений и управление работой прибора;

6. цифровой индикатор (дисплей) для отображения результатов измерений и вспомогательной информации.

Принцип действия прибора, работающего в режиме фотометра, основан на сравнении светового потока  $\Phi_0$ , прошедшего через раствор сравнения (контрольный раствор, по отношению к которому производится измерение, или воздух при пустом кюветном отделении) и светового потока  $\Phi$ , прошедшего через исследуемую среду.

Световые потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi$  преобразуются фотоприемником в электрические сигналы  $I_0$  и  $I$ . Также измеряется  $I_T$  – сигнал от неосвещенного приемника. По величинам этих сигналов микропроцессором спектрофотометра рассчитывается и отображается на дисплее результат измерения в виде коэффициента пропускания  $T$ , оптической плотности или концентрации в зависимости от выбранного режима измерения.

Коэффициент пропускания  $\tau$  рассчитывается прибором как отношение потоков или сигналов по формулам:

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{I - I_T}{I_0 - I_T}.$$

Пропускание в процентах  $T$ :

$$T = \tau \cdot 100\%.$$

(3.1)



Таким образом в режиме коэффициента пропускания  $T$  при пустом кюветном отделении, прибор фактически будет измерять относительную интенсивность излучения источника света на данной установленной длине волны. За величину  $\Phi_0$ , относительно которой измеряется интенсивность  $\Phi$  будем принимать световой поток от белого светодиода, имеющего приближенно сплошной спектр в области 300 — 700 нм.

Для уменьшения рассеянного света и срезания высших порядков дифракции монохроматор снабжен несколькими светофильтрами. Светофильтры устанавливаются автоматически в зависимости от положения ручки «ДЛИНА ВОЛНЫ» прибора при нажатии кнопки  $\Lambda$  (0A/100%T) спектрофотометра.

Мы будем использовать монохроматор для анализа источника излучения, а именно для получения кривой фотоэмиссии образцов светодиодов. Поэтому следует перевести прибор в режим измерения коэффициента пропускания  $T$ .

### Порядок выполнения.

1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств. **Все контрольные точки следует использовать строго по назначению! Запрещается замыкать выводы контрольных точек, не предназначенных для этого в данной работе!**
2. **Настоятельно рекомендуется перед началом работы ознакомиться с паспортом на используемый спектрофотометр (монохроматор).**
3. Подключите выход «ОБРАЗЦЫ/СВЕТОДИОДЫ» ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ ко входу «ОБРАЗЦЫ/СВЕТОДИОДЫ» спектрофотометра специальным соединительным кабелем из комплекта.
4. Включите лабораторный модуль (ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ) в сеть ~220 В. **На данном этапе не включайте спектрофотометр.**
5. Перевести переключатель СЕТЬ на панели ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ в положение «ВКЛ» при этом должен загореться соответствующий сигнальный светодиод. Дать прибору прогреться не менее 5-7 минут.
6. Соединительной перемычкой типа «тюльпан-тюльпан» подключите в схему источник спектра сравнения — белый светодиод VD4 (рис. 3.1), соединив клеммы XS7 – XS8.
7. Плавно вращая ручку управления «R4» до упора по часовой стрелке установить максимально возможный ток светодиода по показаниям миллиамперметра.
8. Подключите спектрофотометр в сеть ~220 В и включите спектрофотометр нажатием клавиши (I/O), находящейся на задней панели прибора при включенном источнике спектра сравнения (белый светодиод).
9. Дайте приборы прогреться 3 — 4 минуты.
10. Исследуйте кривую фотоэмиссии синего светодиода. Для этого, отключив белый светодиод от схемы, подключите перемычку типа «тюльпан — тюльпан» к клеммам XS1 – XS2 ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ.
11. Плавно вращая ручку управления «R1» до упора по часовой стрелке установить максимально возможный ток синего светодиода по показаниям миллиамперметра.
12. Переведите спектрофотометр в режим измерения коэффициент пропускания, нажимая кнопку выбора режима РЕЖИМ до тех пор, пока не загорится светодиод у соответствующей надписи (Т).
13. Ручкой установки ДЛИНА ВОЛНЫ спектрофотометра установите длину волны в диапазоне 430 — 440 нм и нажмите кнопку  $\Lambda$  (0A/100%T) для калибровки фотодатчика и установки соответствующего светофильтра.
14. Установите ручкой управления «R1» ток образца светодиода, равный примерно половине максимального значения и вращением ручки ДЛИНА ВОЛНЫ монохроматора осуществите предварительное сканирование фотоэмиссионной кривой в диапазоне 400 — 500 нм. При этом обращайте внимание на показания относительной интенсивности. Если на какой либо длине волны показания равны 200 % (максимум), это означает, что

на фотодатчик поступает слишком сильный сигнал. В таком случае следует ослабить ток светодиода вращением ручки R1 и повторить сканирование.

15. Осуществите точное сканирование фотоэмиссионной кривой синего светодиода, плавно вращая ручку «ДЛИНА ВОЛНЫ» спектрофотометра в диапазоне 400 — 500 нм с шагом 0,5 нм или 1 нм, и записывая показания относительной интенсивности излучения  $T$  в %, соответствующее данной длине волны. В обозначениях прибора относительная интенсивность излучения, как было сказано выше, это — коэффициент пропускания  $T$  (см. формулу 3.1)
16. По данным измерений постройте кривую фотоэмиссии источника излучения как зависимость относительной интенсивности излучения  $I$  от длины волны  $\lambda$ . Кривая должна иметь вид, аналогичный рис. 2.3.
17. Из фотоэмиссионной кривой определите положение  $\lambda_m$  — длины волны, при которой интенсивность излучения максимальна.
18. Из формулы (2.4) вычислите ширину запрещенной зоны  $\Delta E$  образца полупроводника.
19. Определите из полученного экспериментального графика ширину спектральной линии излучения как расстояние между точками ее контура (на графике рис. 2.3 —  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ), соответствующими интенсивности, равной половине максимальной, как это показано на рис. 2.3.
20. По формуле (2.5) оцените погрешность определения ширины запрещенной зоны данного образца.
21. Исследуйте кривую фотоэмиссии зеленого светодиода. Для этого, отключив все другие светодиоды от схемы, подключите переключку типа «тюльпан — тюльпан» к клеммам XS3 — XS4 ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ.
22. Плавно вращая ручку управления «R2» до упора по часовой стрелке установить максимально возможный ток зеленого светодиода по показаниям миллиамперметра.
23. В режиме измерения коэффициента пропускания  $T$ , ручкой установки ДЛИНА ВОЛНЫ спектрофотометра установите длину волны в диапазоне 490 — 500 нм и нажмите кнопку  $\Lambda$  (0A/100%T) для калибровки фотодатчика и установки соответствующего светофильтра.
24. Установите ручкой управления «R2» ток образца светодиода, равный примерно половине максимального значения и повторите действия, аналогичные пп. 14 — 20. Сканирование фотоэмиссионной кривой данного образца зеленого светодиода осуществлять в диапазоне 450 — 600 нм.
25. Исследуйте кривую фотоэмиссии красного (лазерного) светодиода. Для этого, отключив все другие светодиоды от схемы, подключите переключку типа «тюльпан — тюльпан» к клеммам XS5 — XS6 ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ.
26. Плавно вращая ручку управления «R3» до упора по часовой стрелке

- установить максимально возможный ток красного светодиода по показаниям миллиамперметра.
27. В режиме измерения коэффициента пропускания T, ручкой установки ДЛИНА ВОЛНЫ спектрофотометра установите длину волны в диапазоне 600 — 610 нм и нажмите кнопку  $\Lambda$  (0A/100%T) для калибровки фотодатчика и установки соответствующего светофильтра.
  28. Установите ручкой управления «R3» ток образца светодиода, равный примерно половине максимального значения и повторите действия, аналогичные пп. 14 — 20. Сканирования фотоэмиссионной кривой данного образца красного светодиода осуществлять в диапазоне 550 — 650 нм.
  29. По окончании работы отключить установку и спектрофотометр от сети, поставив переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какое основное отличие проводимости полупроводников от проводимости металлов?
2. Как образуются валентная зона и зона проводимости в полупроводниках?
3. Что определяет ширина запрещенной зоны в полупроводниках?
4. Запишите формулу, по которой рассчитывается ширина запрещенной зоны. Поясните смысл обозначений.
5. Каково назначение монохроматора?
6. Что называется светодиодом?
7. Что называется шириной запрещенной зоны?
8. Что называется шириной спектра излучения? Что она характеризует?

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. «Энциклопедия для детей. Физика». Том 16. Стр. 157, 200, 216. М. «Аванта+». 2000.
2. Л.И. Пономарёв. «Под знаком кванта». М. «Наука». Главная редакция физико–математической литературы. 1989.
3. Ю.Р. Носов «Дебют оптоэлектроники». Библиотечка «Квант», выпуск 84. М. «Наука». Главная редакция физико–математической литературы. 1992.
4. В.А. Беляков, Е.С. Ицкевич, Б.М.Болотовский «Школьникам о современной физике» Электромагнетизм. Твёрдое тело. М. «Просвещение» 1982
5. «Физическая энциклопедия» том 4. М. Научное издательство «Большая Российская энциклопедия» 1994.
6. «Физическая энциклопедия» том 1. М. «Советская энциклопедия» 1994.
7. О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов «Экспериментальные задания по физике 9 – 11 классы». М. «Вербум - М», 2001.
8. «Физический практикум для классов с углубленным изучением физики», Под редакцией Ю.А. Дика, О.Ф. Кабардина. М. «Просвещение», 1993.
9. И.П. Жеребцов «Основы электроники», Ленинград, «Энергоатомиздат», 1990.
10. М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин «Барьеры», Библиотечка «Квант», выпуск 65. М. «Наука», Главная редакция физико–математической литературы. 1987.
11. Г.Я. Мякишев, «Физика 10 –11. Электродинамика», учебник для углубленного изучения физики. М. «Дрофа», 2001.
12. Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков «Физика 11. Оптика. Квантовая физика.», учебник для углубленного изучения физики. М. «Дрофа», 2001.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**