

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА СВЕТОДИОДЫ

Методические указания к лабораторным работам для студентов всех специальностей и направлений подготовки

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

УДК 537.311.33

ФИЗИКА. Светодиоды. Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Т.В. Стоянова, В.В. Томаев, К.Л. Левин* СПб, 2019. 22 с.

Методические указания к лабораторным работам являются частью цикла лабораторного практикума по дисциплине «Физика».

Основная задача – овладеть профессиональными компетенциями. В результате – студент должен продемонстрировать знание физических явлений и фундаментальных законов раздела «Физика твёрдого тела» показать владение лабораторными приборами, методами исследования, техникой и методикой эксперимента; продемонстрировать навыки компьютерного моделирования при обработке результатов и оценке точности измерений.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата и магистратуры Горного университета.

Научный редактор: *проф. А.С. Мустафаев*

Рецензент: *к.ф. – м. н. А.В. Черняев* (ООО «ЛЕД Микросенсор НТ»)

© Санкт-Петербургский горный университет, 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемых методических указаниях к лабораторным работам по курсу «Физика» представлена работа по разделу контактные явления. В лабораторной работе «Светодиоды» изучаются: элементы зонной теории твёрдых тел, физические принципы, лежащие в основе работы светодиодов.

Целью лабораторных работ является иллюстрация явлений в различных областях физики, обучение пользованием измерительными приборами, методами и способами их правильного применения, приобретение базовых концепций, относящиеся к физическому эксперименту. Студенту так же предстоит научиться оценивать и записывать измерения с заданной степенью точности, анализировать данные в численном и графическом виде, излагать свои мысли в отчете к лабораторной работе. Совершенствовать навыки использования компьютера для написания отчетов и оформления графиков.

Прежде чем приступить к изучению теоретической части лабораторной работы, рекомендуется познакомиться с основами зонной теории твердых тел и только после этого перейти к теории, изложенной в описании работы. При подготовке к экспериментальной части лабораторной работы студенту необходимо изготовить заготовку, в которой должны присутствовать: цель работы, схема экспериментальной установки с указанием и расшифровкой ее основных элементов, рабочая формула или формулы, если их несколько, с расшифровкой величин, входящих в формулу и их размерности, таблица для записи результатов измерений. Титульный лист заготовки заполняется в соответствии с правилами заполнения титульных листов лабораторных работ.

Заполнение таблицы с результатами измерений следует проводить аккуратно, в строгом соответствии с показаниями приборов. Результаты измерений необходимо записывать непосредственно такими, какими они сняты с приборов, без какой-либо предварительной обработки. В случае если измерение выглядит неправдоподобно, необходимо перепроверить схему подключения прибора и аккуратно повторить измерение.

Никаких, даже самых простых арифметических расчетов, нельзя делать «в уме» для уменьшения вероятности ошибок. Промежуточные вычисления, если они есть, необходимо приводить в заготовке в письменном виде от руки.

Для самоконтроля готовности студента к лабораторной работе служат контрольные вопросы, приведенные в конце каждой работы. Они облегчают подготовку к выполнению и защите работ.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Каждый электрон, входящий в состав атома, обладает определенной полной энергией, т.е. занимает определенный энергетический уровень. Если атомы далеки друг от друга (газ), то взаимодействие между атомами отсутствует, и энергетические уровни остаются неизменными. В

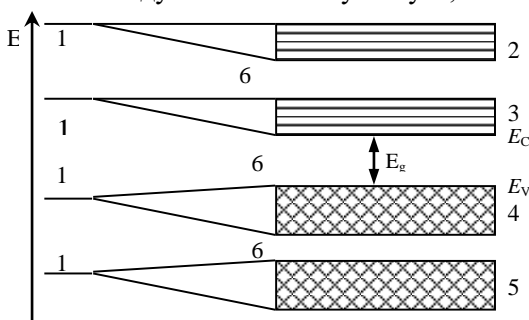


Рис. 1. Энергетические зоны неметаллов. 1 – уровни невозбуждённого атома, 2,3,4,5 – разрешённые зоны, 6 – запрещённые зоны, 2,3 – свободные зоны, 4,5 – занятые (заполненные) зоны, 3 – зона проводимости, 4 – валентная зона, E_g – ширина запрещённой зоны, E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны.

твердом теле атомы расположены близко друг к другу и волновые функции соседних атомов перекрываются. Благодаря взаимодействию соседних атомов, атомарные энергетиче-

ские уровни электронов несколько смещаются и расщепляются, образуя энергетические зоны, состоящие из отдельных близко расположенных по энергии уровней (Рис. 1).

Энергетическую зону или совокупность нескольких перекрывающихся энергетических зон, которые образовались в результате расщепления одного или нескольких энергетических уровней отдельных атомов, называют разрешенной зоной.

Электроны в твердом теле могут иметь только энергии, соответствующие разрешенной зоне. Между разрешенными зонами находятся *запрещенные зоны*, т.е. области значений энергий, которыми не могут обладать электроны в идеальном кристалле.

Ширина разрешенных энергетических зон не зависит от размеров кристалла, а определяется природой атомов (глубиной кулоновской потенциальной ямы и ее шириной) и симметрией кристаллической решетки (взаимным расположением потенциальных ям), т.е. перекрытием волновых функций электронов. Так как волновые функции электронов внутренних оболочек атомов сильно локализованы вблизи ядра, то они слабо перекрываются (или почти не перекрываются) и расщепление этих уровней меньше (практически отсутствует), чем расщепление энергетических уровней валентных электронов. Ширина разрешенной зоны валентных электронов не превышает единиц электрон-вольт. Количество уровней в зоне равно числу атомов, составляющих твердое тело, а энергетическое расстояние между этими уровнями обратно пропорционально количеству атомов. Так как в 1 см^3 содержится $10^{22} - 10^{23}$ атомов, то уровни в зоне отстоят друг от друга по энергии на $10^{-22} - 10^{-23}$ эВ, т.е. энергетическая зона практически непрерывна. Достаточно ничтожно малого энергетического воздействия, чтобы вызвать переход электронов с одного уровня на другой, если там имеются свободные состояния.

Электроны, будучи фермионами (спин равен $1/2$), подчиняются принципу Паули, по которому на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, причем с противоположно направленными спиновыми магнитными моментами. Соответственно, конечным оказывается и число электронов, заполняющих данную энергетическую зону. Нижние зоны заполнены полностью, а верхние –

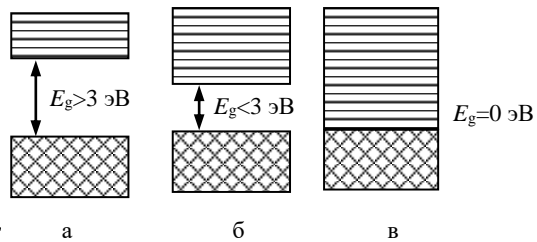


Рис. 2. Структура энергетических зон твёрдых тел.

свободны. Самая верхняя из заполненных зон называется *валентной зоной* (valence band – VB). Ближайшую к ней свободную зону называют *зоной проводимости* (conduction band – CB). Энергетический зазор между ними называется *запрещенной зоной* E_g . Взаимное расположение зоны проводимости и валентной зоны определяет электрические, оптические и другие свойства твердых тел, а ширина запрещенной зоны является фундаментальной характеристикой вещества: $E_{g(\text{Si})} = 1,12 \text{ эВ}$, $E_{g(\text{Ge})} = 0,68 \text{ эВ}$, $E_{g(\text{GaAs})} = 1,43 \text{ эВ}$, ($C_{\text{алмаз}} \approx 5 \text{ эВ}$).

Зонные структуры металлов и неметаллов существенно различаются: в металлах валентная зона заполнена не полностью или перекрывается с зоной проводимости (рис. 2в). Это позволяет считать, что ширина запрещенной зоны в металлах равна нулю.

В неметаллах запрещенная зона имеет конечную ширину. Формально считается, что у диэлектриков $E_g > 3 \text{ эВ}$ (рис. 2а), а у полупроводников – $E_g < 3 \text{ эВ}$ (рис. 2б), однако это деление условно.

В полупроводниках и диэлектриках при $T = 0 \text{ К}$ все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости абсолютно свободна.

Электроны полностью заполненной валентной зоны не могут принять участие в создании электрического тока. Для появления электропроводности необходимо часть электронов перевести из валентной зоны в зону проводимости. Энергии электрического поля недостаточно для такого перехода, требуется другое более сильное воздействие, например, нагревание твердого тела. При нагревании твердого тела средняя кинетическая энергия тепловых колебаний атомов кристаллической решетки приблизительно равна $3/2(kT)$. При комнатной температуре эта величина составляет $0,04 \text{ эВ}$, что существенно меньше ширины запрещенной зоны. Однако тепловая энергия неравномерно распределяется между частицами. В каждый момент времени имеется небольшое число атомов, у которых амплитуда и энергия тепловых колебаний значительно превышают среднее значение. Электронам таких атомов может быть передана энергия, достаточная для перехода из валентной зоны в зону проводимости. Чем выше температура и меньше ширина запрещенной зоны, тем больше таких переходов совершается. У диэлектриков

ширина запрещенной зоны столь велика, что такие переходы практически не происходят, и они являются изоляторами.

При переходе электрона в зону проводимости появляется свободное состояние в валентной зоне, которое называется «дыркой». Это состояние может быть занято электроном от соседнего атома, что эквивалентно перемещению свободного состояния. Теперь на это состояние может перейти электрон от третьего атома. Таким образом, происходят эстафетные переходы электронов с уровня на уровень внутри разрешенной зоны. Это эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов, т.е. дырка ведет себя как положительно заряженная частица. Получается, что электроны валентной зоны также могут принимать участие в электропроводности, при этом сложное перемещение коллектива электронов валентной зоны можно описать как движение свободной положительно заряженной квазичастицы – дырки, имеющей эффективную массу m_p^* . Таким образом, в полупроводниках существуют отрицательно заряженные свободные носители заряда – электроны с массой m_n^* и положительно заряженные дырки с m_p^* .

Примесные атомы создают дополнительные уровни, расположенные в запрещенной зоне полупроводника (рис.3). При малой концентрации примесей расстояние между примесными атомами велико, волновые функции их валентных электронов не перекрываются друг с другом. Вследствие этого примесные энергетические уровни являются дискретными,

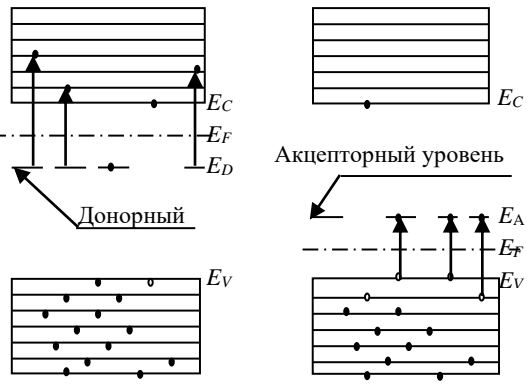


Рис. 3. Энергетические диаграммы полупроводников электронного (а) и дырочного (б) типов при $T > 0$ К, где ● - электрон, ○ - дырка.

т.е. не расщепляются в зону, вероятность перехода электрона от

одного примесного атома к другому ничтожно мала. Однако примеси могут поставлять электроны либо в зону проводимости (донорные примеси), либо принимать электроны из валентной зоны (акцепторные примеси).

В случае электронного полупроводника (n -типа) (рис. 3а) при внешнем воздействии электроны с примесных (донорных) уровней E_D легко переходят в зону проводимости и могут участвовать в процессе электропроводности. Так как энергия, необходимая для таких переходов $\Delta E_D \ll E_g$, то при низких температурах (порядка комнатных) доноры являются основными поставщиками электронов в зону проводимости, вклад собственных носителей ничтожен.

В случае дырочного полупроводника (p -типа) (рис. 3б) примесные (акцепторные) уровни E_A находятся вблизи потолка валентной зоны $\Delta E_A \ll E_g$ и при небольшом воздействии электроны из валентной зоны легко переходят на эти уровни, в валентной зоне появляются дырки. При увеличении концентрации примесей увеличивается вероятность их взаимодействия, (волновые функции электронов примесных атомов начинают перекрываться), происходит расщепление примесных энергетических уровней в зону и уменьшение энергии ионизации примесей.

При очень большой концентрации примесей энергия ионизации примесей стремится к нулю, т.е. примесная зона сливается с краем разрешенной зоны.

Энергия ионизации равна работе, затрачиваемой на удаление одного внешнего электрона из атома (на ионизацию атома), находящегося в основном (не возбуждённом) энергетическом состоянии.

В этом случае полупроводник становится вырожденным.

Вырожденный полупроводник – полупроводник с большой концентрацией подвижных носителей заряда (электронов проводимости и дырок).

Уровень Ферми E_F такого полупроводника лежит в зоне проводимости или в валентной зоне.

Уровень Ферми – энергия, ниже которой, в основном состоянии при температуре абсолютного нуля ($T = 0\text{ K}$), все состоя-

ния системы частиц или квазичастиц, подчиняющихся статистике Ферми - Дирака заполнены, а выше – пустые.

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

В основе светоизлучающего диода лежит многослойная гетероструктура. Гетероструктура представляет собой последовательность полупроводниковых слоев отличающихся химическим составом и шириной запрещенной зоны.

Гетеропереходом называют переходный слой с существующим в нём диффузионным электрическим полем между двумя различными по химическому составу полупроводниками.

Для формирования качественного гетероперехода необходимо совпадение типа, ориентации и периода кристаллических решёток контактирующих полупроводников.

При образовании гетероперехода, из-за различия работ выхода электронов из разных полупроводников, происходит перераспределение носителей заряда в приконтактной области и выравнивание уровней Ферми. В результате установления термодинамического равновесия, остальные энергетические уровни изгибаются – возникают диффузионное электрическое поле и контактная разность потенциалов. *Под работой выхода понимают энергию, необходимую для перевода электрона с уровня Ферми на потолок верхней свободной зоны.* Энергетические зоны различных полупроводников отличаются по ширине, поэтому на границе раздела двух полупроводников получается разрыв дна зоны проводимости и валентной зоны, что приводит к наличию разной высоты потенциального барьера для электронов и дырок. В связи с этим, прямой ток через гетеропереход связан в основном с движением носителей заряда только одного знака.

Гетеропереходы делятся на три основные типа:

- а) гетеропереход I типа,
- б) ступенчатый гетеропереход II типа,
- в) разьединенный гетеропереход II типа

В гетеропереходах I типа (Рис. 4а) валентная зона и зона проводимости узкозонного полупроводника "вставлены" в запре-

шенную зону широкозонного материала. Классическими представителями этого типа являются системы GaAs-AlGaAs и InP-InGaAs, которые широко применяются при изготовлении лазеров ближнего инфракрасного диапазона (от 0,7 мкм до 1 мкм) .

В гетеропереходах второго типа разрывы валентной зоны и

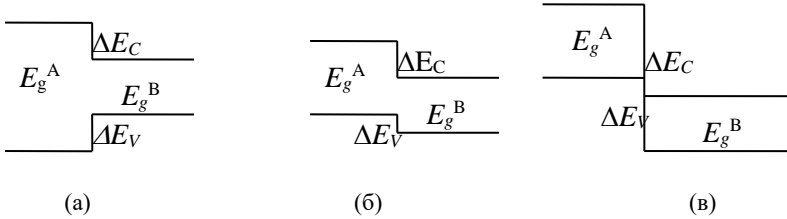


Рис. 4 Схематическое изображение разных типов гетеропереходов: а) гетеропереход I типа, б) ступенчатый гетеропереход II типа, в) разъединенный гетеропереход II типа, где ΔE_C , ΔE_V – разрывы зон проводимости и валентных зон; E_g^A ширина запрещенной зоны полупроводника А, E_g^B - полупроводника В.

зоны проводимости на гетерогранице могут быть столь большими, что зона проводимости одного материала будет лежать ниже валентной зоны другого материала (Рис. 4в), как это имеет место в системе GaSb-InAs. Такой гетеропереход называют разъединённым.

Фундаментальным свойством гетеропереходов II типа является пространственное разделение электронов и дырок и их накопление в самосогласованных квантовых ямах на границе перехода. Из-за пространственного разделения носителей может происходить туннельная излучательная рекомбинация через гетерограницу II типа с энергией излучения меньше ширины запрещенной зоны узкозонного материала.

В гетеропереходах второго рода на границе раздела между двумя различными по химическому составу полупроводниками, в образованных потенциальных ямах, происходит накопление со стороны одного полупроводника – электронов, а со стороны другого полупроводника – дырок. Накопленные противоположные заряды различных зон оказывают влияние друг на друга. Образованные на границе двух различных по химическому составу полупроводников

потенциальные ямы называются самосогласованными потенциальными ямами. В этом случае, при расчёте зонной диаграммы одного полупроводника, необходимо учитывать энергетические состояния в прилегающем полупроводнике.

Квантовая яма может быть рассмотрена как потенциальная яма для квантовой частицы, в которой движение частицы ограничено двумя измерениями. Характерной особенностью движения квантовой частицы в квантовой яме является то, что набор возможных (разрешенных) значений её энергии дискретен.

На рис. 5 схематически изображена двумерная потенциальная яма, где: по оси ординат отложена энергия квантовой частицы, по оси абсцисс – ее координата; ширина квантовой ямы – a ; $E_1...E_n$ – набор дискретных значений энергии квантовой частицы.

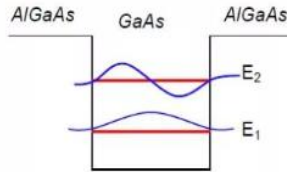


Рис. 5. Двумерная потенциальная яма.

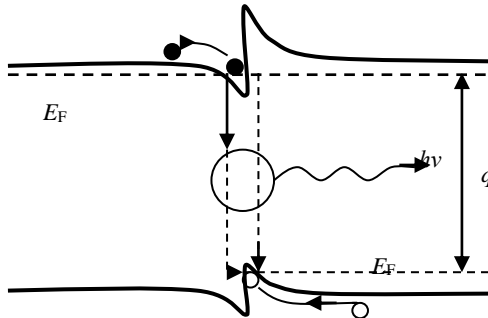


Рис.6. Энергетическая диаграмма ступенчатого $n-p$ гетероперехода II типа при прямом смещении, где E_F – энергия Ферми, $h\nu$ – энергия излученного

Условия рекомбинации на гетерограницах II типа сильно зависят от приложенного внешнего электрического поля. Процесс возвращения электрона из зоны проводимости в валентную зону называется рекомбинацией.

Применение гетеропереходов для формирования широкозонного окна в фотоприемниках, электронного и оптического ограничения в лазерах привело к принципиальному улучшению параметров этих приборов.

В настоящее время практически все оптоэлектронные приборы основаны на гетероструктурах. Гетероструктура – полупроводниковая структура с несколькими гетеропереходами.

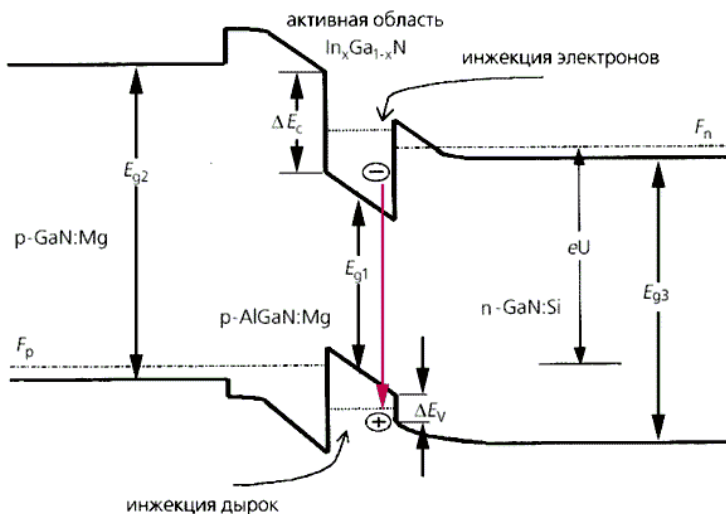


Рис.7. Энергетическая диаграмма $p-n$ гетероструктуры при прямом смещении, где F_p, F_n – энергии Ферми в p - и n -полупроводниках, E_{g2}, E_{g3} – запрещённые зоны широкозонных полупроводников, E_{g1} – ширина запрещённой зоны узкозонного полупроводника, $\Delta E_c, \Delta E_v$ – разрыв зоны проводимости и валентной зоны.

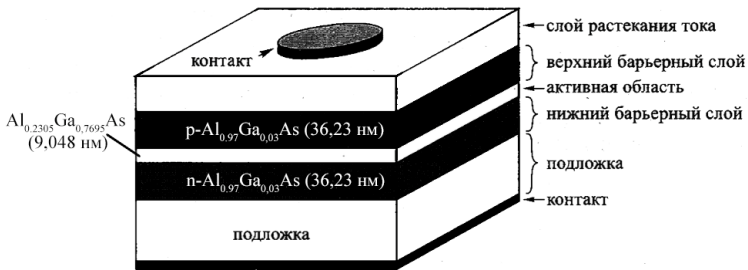


Рис.8. Светодиодная структура.

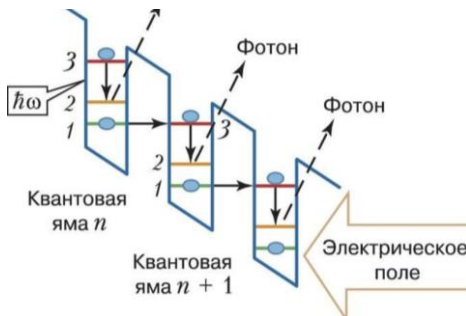


Рис.9. Энергетическая диаграмма сверхрешётки квантово-каскадного лазера.

Создание на базе гетеропереходов сверхрешёток, квантовых ям и квантовых точек открыло новые возможности для дальнейшего снижения пороговых токов лазеров и увеличения их мощности, появления лазеров с вертикальным резонатором, а так же совершенно новых типов полупроводниковых приборов.

Лабораторная работа СВЕТОДИОДЫ

Цель работы: знакомство с понятием «гетеропереход» и физическими принципами работы светодиодов.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Светоизлучающий диод (LED – Light-emitting diode) – это полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию, в энергию оптического излучения. Излучение вызвано рекомбинацией (возвращением электронов из зоны проводимости в валентную зону) носителей заряда при прохождении тока в прямом направлении через выпрямляющий электрический переход.

Область структуры светодиода в которой происходит рекомбинация электронов и дырок называется активной.

Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра электромагнитных волн. Длина волны излучения светодиода зависит от химического состава использованного в активной области полупроводника.

Красные и желтые светодиоды изготавливаются из твердых растворов соединений элементов $AlGaInP$ или $AlGaAs$, а зеленые и синие из более широкозонного материала $InGaN$.

Для того чтобы кванты энергии (фотоны), освобожденные при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть достаточно большой ($\Delta E > 1,7$ эВ), при меньшей ширине запрещенной зоны исходного полупроводника кванты энергии, освобождающиеся при рекомбинации носителей заряда, соответствуют инфракрасной области излучения.

Активная область ограничена слоями полупроводника с большей шириной запрещенной зоны, которые обеспечивают локализацию носителей в узкозонной области, что приводит к увеличению вероятности рекомбинации носителей заряда.

Отношение излученных фотонов к числу рекомбинировавших пар носителей называется внутренним квантовым выходом. Если бы рекомбинация неравновесных электронов и дырок, в активной области происходила только с излучением фотонов, то внутренний квантовый выход был бы равен 100%. Однако значительная часть актов рекомбинации не заканчивается выделением энергии в виде фотонов. Такие переходы электронов между энергетическими уровнями называют безызлучательными. Соотношение

между излучательными и безызлучательными переходами зависит от ряда причин, в частности *от структуры энергетических зон*

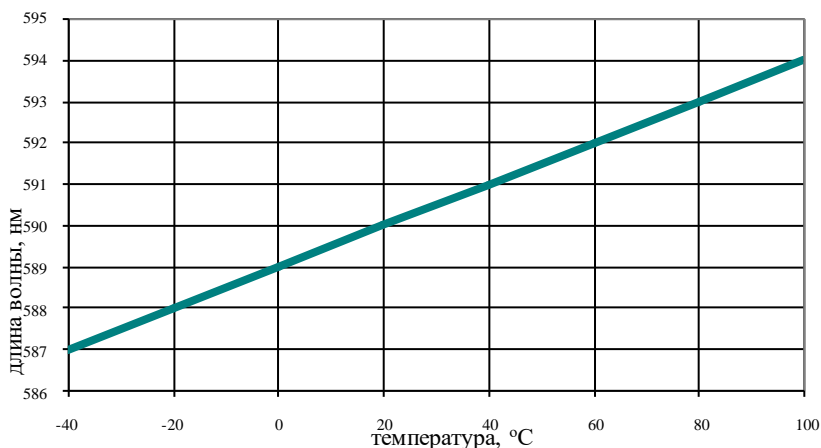


Рис. 10. Зависимость длины волны желтого светодиода от температуры активной области

полупроводника, наличия примесей, которые могут увеличить или уменьшить вероятность излучательных переходов.

Увеличение длины волны с повышением температуры активной области светодиода вызвано уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника, при этом, из-за увеличения влияния колебаний кристаллической решетки уменьшается внутренний квантовый выход.

Яркость светодиода с увеличением температуры падает. Падение яркости с повышением температуры не одинаково у светодиодов разных цветов. У материалов с меньшей шириной запрещенной зоны температурная зависимость длины волны и яркости сильнее. Она больше у красных и желтых, и меньше у зеленых, синих и белых. Поэтому для надежной и стабильной работы светодиодов важен хороший теплоотвод.

Даже при высоком внутреннем квантовом выходе внешний квантовый выход значительно меньше. Образовавшиеся фотоны

могут поглотиться полупроводником до выхода в окружающее пространство.

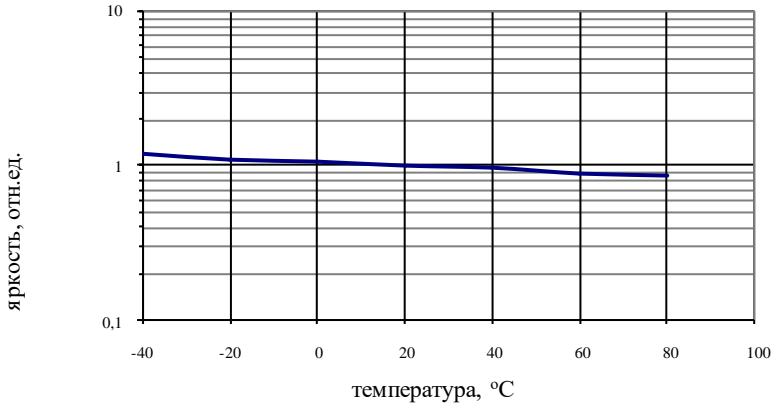
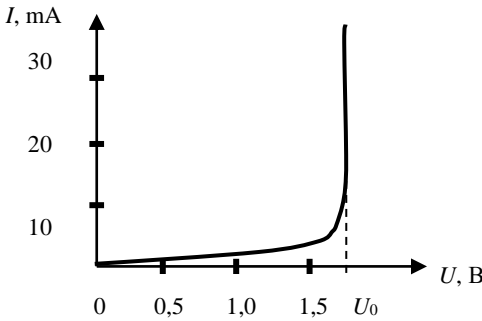


Рис. 11. Зависимость яркости желтого светодиода от температуры активной области.

Существенными могут оказаться потери при полном внутреннем отражении фотонов, падающих на границу раздела полупроводника и окружающей атмосферы под углом, превышающим критический угол полного внутреннего отражения:



$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1)$$

где n_2 – абсолютный показатель преломления среды, окружающей полупроводник, n_1 – абсолютный показатель преломления полупроводника.

Для многих полупроводников $\alpha_c \leq 17^\circ$, поэтому если полупроводник имеет плоскую форму, то только незначительная часть фотонов покинет

полупроводник. Наиболее простым решением является формирование на поверхности кристалла сферического покрытия из пластического материала с высоким показателем преломления для увеличения критического угла полного внутреннего отражения.

Допустим, что при каждом акте рекомбинации электрона и дырки получается один квант света, энергия которого определяется:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}. \quad (2)$$

При увеличении от нуля прямого напряжения, подаваемого на светодиод, ток медленно нарастает. Когда напряжение достигает значения U_0 , сила тока резко возрастает и светодиод начинает излучать свет. Внешнее электрическое поле для перевода электрона через p - n переход совершает работу:

$$A = eU_0, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, U_0 – величина внешнего поля, при котором светодиод начинает светиться. В этом случае:

$$h \frac{c}{\lambda} = eU_0. \quad (4)$$

Из формулы(4) можно определить постоянную Планка:

$$h = \frac{eU_0\lambda}{c}. \quad (5)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает в себя источник тока, вольтметр, амперметр, магазин сопротивлений и коммутационную коробку со светодиодами (рис. 14).

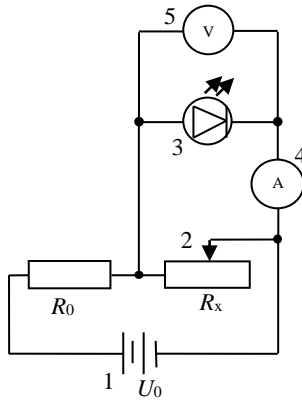


Рис.13. Электрическая схема

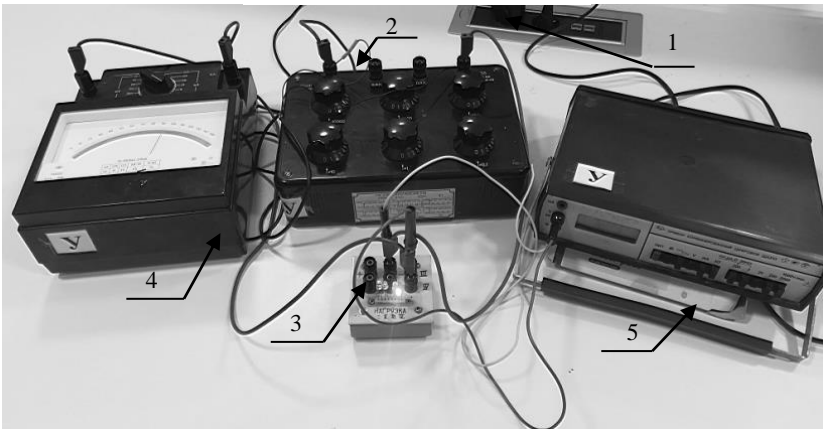


Рис.14. Вид установки, где: источник тока (1), магазина сопротивлений (2), коммутационной коробки со светодиодами (3), амперметр (4) и вольтметр (5).

Характеристики светодиодов

Таблица 1

Цвет	Длина волны, нм	Рабочее	
		Напряжение, В	Сила тока, мА
Синий	470	4,5	30
Зелёный	520-525	3,5	30
Оранжевый	590	2	20
Красный	620	2	20

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проверьте по электрической схеме правильность соединения приборов.

2. Для начала работы соедините один конец провода идущего от вольтметра, и конец провода идущего от магазина сопротивлений вместе и вставьте в разъем одного из светодиодов (I, II, или IV) на коммутационной коробке (3). Конец провода идущего от амперметра, и второй конец провода идущего от вольтметра должны быть соединены вместе и вставлены в разъем III на коммутационной коробке.

3. На магазине сопротивлений (2) выставите сопротивление R_x не более 1 кОм.

4. Изменяя сопротивление на магазине сопротивлений, снимите вольтамперную характеристику светодиода (зависимость силы тока от напряжения), стараясь точно определить значение напряжения, при котором светодиод начинает светить.

5. Повторите измерения для других светодиодов. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Вольтамперные характеристики

Таблица 2

№ п/п	Светодиод							
	Красный		Оранжевый		Зелёный		Синий	
	I , мА	U , мВ	I , мА	U , мВ	I , мА	U , мВ	I , мА	U , мВ

4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Постройте вольтамперные характеристики.

2. По графическим зависимостям определите U_0

3. По формуле (5) определите постоянную Планка h .

4. Результаты вычислений занесите в таблицу 3.

5. Найдите среднее значение h .

6. Полученный результат сравните со справочной величиной постоянной Планка h . Сделайте выводы.

Светодиод							
Красный		Оранжевый		Зелёный		Синий	
U_0 , мВ	h , Дж·с	U_0 , мВ	h , Дж·с	U_0 , мВ	h , Дж·с	U_0 , мВ	h , Дж·с

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ПРОВЕРКИ ВЛАДЕНИЯ МАТЕРИАЛОМ

1. Что такое светодиод?
2. Объясните принцип образования p - n перехода. Как возникает диффузионное поле? Назовите основные отличия гетероперехода от p - n перехода.
3. Расскажите о типах гетеропереходов и их основных особенностях (фундаментальных свойствах).
4. Для изготовления какого светодиода необходимо взять полупроводник с большей шириной запрещенной зоны – красного или фиолетового?
5. Как влияет температура на яркость светодиода, длину волны и почему?
6. Что называется внутренним квантовым выходом и почему он не равен внешнему?
7. Объясните, каким образом можно по вольт-амперной характеристике светодиода определить постоянную Планка.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ

Отчёт оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой ОТФ, в котором помимо стандартного титульного листа должны быть раскрыты следующие пункты:

1. Цель работы.
2. Краткое теоретическое содержание:
 - 2.1. Явление, изучаемое в работе.
 - 2.2. Определение основных физических понятий, объектов, процессов и величин.

2.3. Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых получены расчётные формулы.

3. Электрическая схема.

4. Расчётные формулы с пояснением к физическим величинам.

5. Формулы погрешностей косвенных измерений.

6. Таблицы с результатами измерений и вычислений.

(Таблицы должны быть пронумерованы и иметь название. Единицы измерения физических величин желательно указать в отдельной строке.

7. Пример вычисления (для одного опыта):

7.1. Расчетная формула.

7.2. Расчетная формула с подстановкой численных значений физических величин.

7.3. Результат вычислений.

8. Графический материал:

8.1. Аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить.

8.2. На осях координат указать масштаб, физические величины и единицы измерения.

8.3. На координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки.

8.4. По результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию, аппроксимирующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

9. Анализ полученных результатов.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин*, Полупроводниковые приборы. М.: «Высшая школа», 2001 г.
2. *Детлаф А.А.*, Курс физики: учеб. пособие [Электронный ресурс]/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - 5-е изд., стер. - М. : АCADEMIA, 2005. - 720 с.и пред. изд. (2003, 2002, 2001, 1998)
3. *Парфенова И.И.* Квантовая механика, физика твёрдого тела и элементы атомной физики. / Парфенова И.И., Егоров С.В., Мустафасв А.С. и др. Сборник задач для студентов технических специальностей, СПб.: СПГТИ (ТУ), 2010. 112 с.
4. *Савельев И.В.* Курс физики: учеб. пособие: в 3 т. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Электронный ресурс] /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 308 с.и пред. изд. (2007,1989, 1987)
5. *Трофимова Т.И.* Курс физики: учеб. пособие [Электронный ресурс]/ Т.И.Трофимова. - 21-е изд., стер. - М. : Академия, 2015. - 560 с. и пред.изд. (2008, 2007, 2004, 1997)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Зонная теория твёрдых тел.....	4
3. Лабораторная работа. Светодиоды.....	8
4. Вопросы для самоконтроля и проверки владения материалом	20
5. Требования к отчёту.....	20
6. Рекомендательный библиографический список.....	22