НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

ФКЛ-20

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СВЕТОДИОДОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА.

Рекомендовано ФТИ УрФУ для лабораторной работы №2
по дисциплине "Атомная физика"

Тула, 2010 г

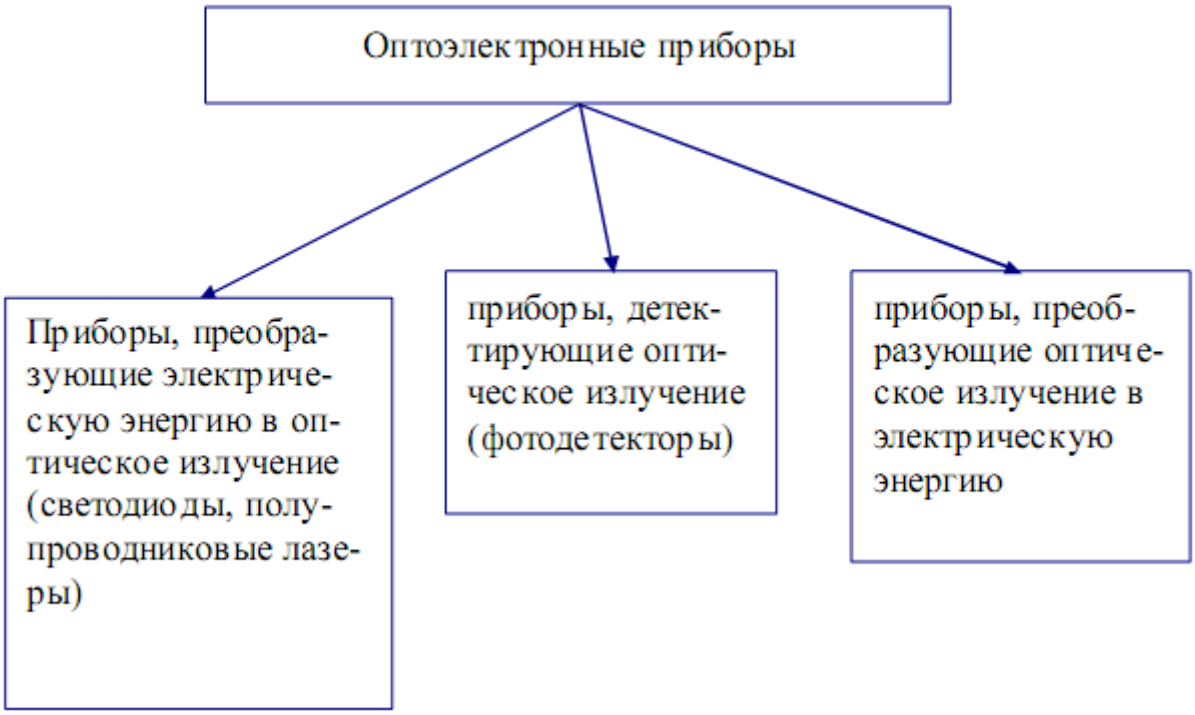
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СВЕТОДИОДОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА.

Цель работы: определение постоянной Планка на основе измерения напряжения включения полупроводниковых светодиодов и полупроводникового лазера и длины волны излучаемого им света.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Полупроводниковые оптические генераторы.



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 p-n перехода, где имеют место излучательные переходы. Основные переходы в полупроводнике показаны на рис. 1.

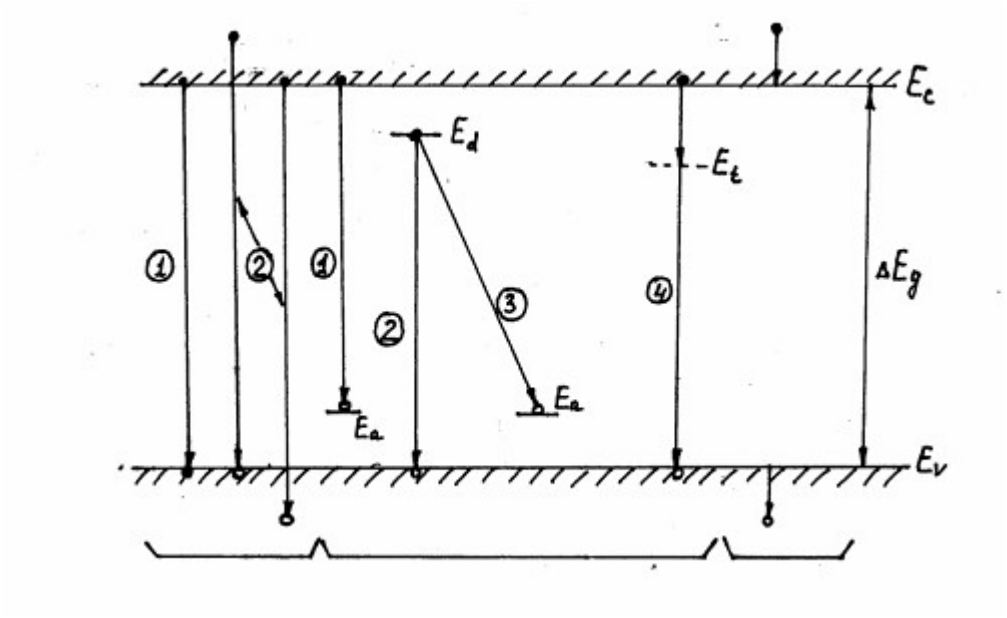


Рис. 1. Основные переходы в полупроводнике.

Переходы можно классифицировать следующим образом:

I – межзонные переходы, вызывающие:

1) – собственное излучение с энергией близкой к ΔE_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 – внутризонные 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 резуль та те перехода электрона из заполненного состояния V-зоны в свободное состояние ЕС.

2. Фотон может стимулировать излучение подобного себе фотона, вызывая переход электрона из заполненного состояния С-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. <M>= 0 (<M> - матричный элемент перехода).

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

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

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

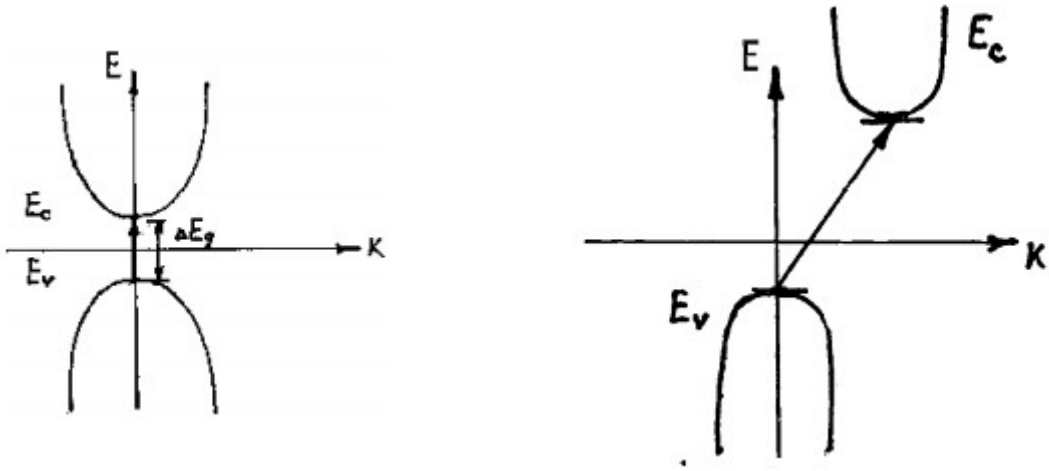


Рис. 2. Схематическое изображение переходов в полупроводниковом светодиоде.

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 энергией 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:

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

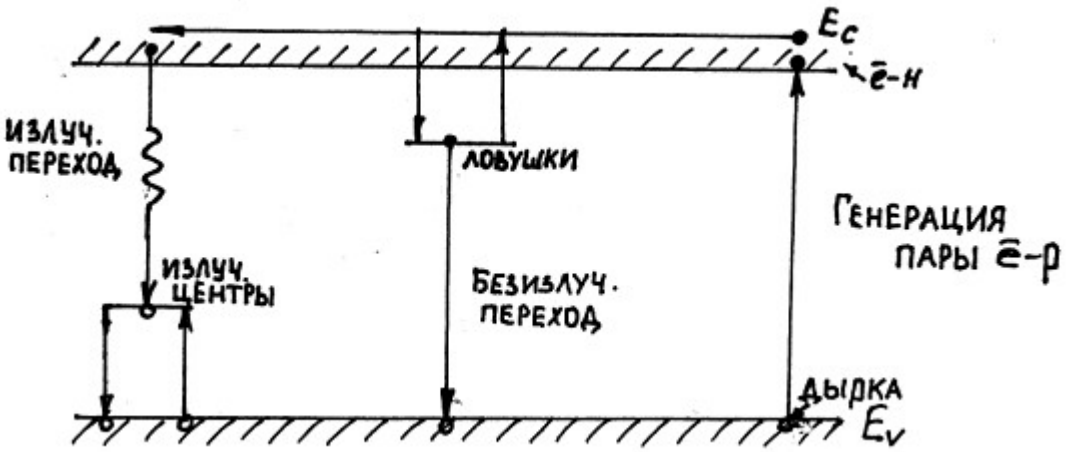


Рис. 3. Схематическое изображение излучательных и безизлучательных переходов.

где τ_r и τ_{nr} – времена жизни излучательной и безизлучательной рекомбинации соответственно, а R_r и R – скорости излучательной и полной рекомбинации.

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

$$R = (n - n_0)/\tau . \tag{1.3}$$

Аналогично для слоев n-типа:

$$R = (p - p_0)/\tau , \tag{1.4}$$

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

Время жизни τ неосновных носителей дается выражением:

$$\tau = \frac{\tau_r \cdot \tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r} . \tag{1.5}$$

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).

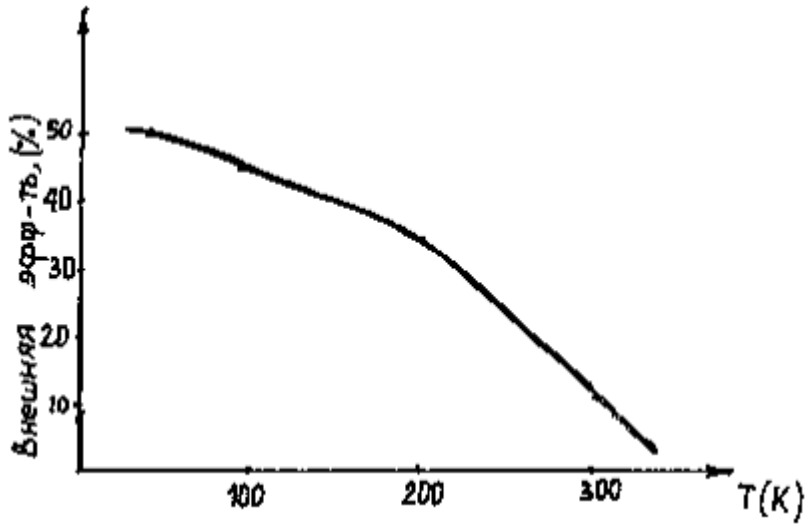


Рис. 4. Зависимость внешней эффективности квантового выхода от температуры.

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.

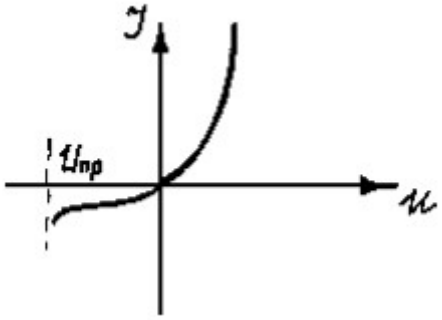


Рис. 5. Вольтамперная характеристика образца при лавинном возбуждении.

Лавинное возбуждение достигается смещением p-n 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 p-n-переходе инжекция неосновных носителей может привести к эффективной излучательной рекомбинации, т. к. в этом случае электрическая

энергия непосредственно преобразуется в фотоны.

Светодиоды видимого диапазона. Основные характеристики.

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

Поскольку глаз чувствителен только к свету с энергией hv ≥1,8 эВ (~0,7 мкм и до ~0,4 мкм), то полупроводники, которые могут быть использованы для создания светодиодов видимого диапазона, должны иметь ширину запрещенной зоны ΔE_g больше этого значения. Это Материалы группы: GaAs, GaP и т. д., а также твердые растворы типа $GaAs_xP_{1-x}$, 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:

$$\eta_{внутр} = \frac{N_{ф}}{N_{пар}} . \qquad (1.6)$$

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

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

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

$$\eta_{внеш} = \frac{N}{N_{ф}} . \qquad (1.7)$$

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

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

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

где φ – угол между нормалью к излучающей поверхности ΔS и

направлением, по которому дифференцируется сила света I.

Для глаза вводится понятие видности:

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

где Ф – световой поток (то есть оцениваемый нашим глазом); Φ_0 – полный световой поток.

Единицей измерения видности в системе СИ: [V]=[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 λ =554 нм (зелено-желтая область) и составляет 683 Лм/Вт.

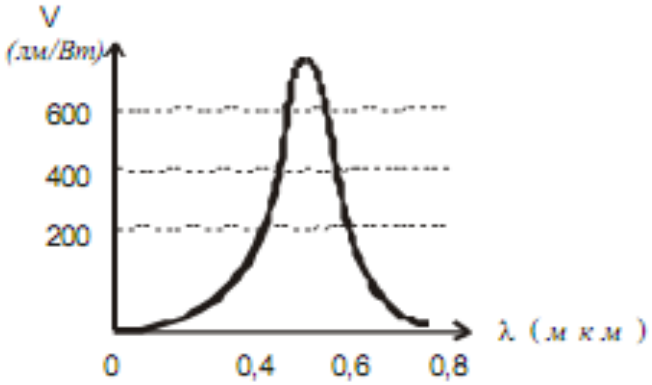


Рис. 6. Яркостная характеристика светодиода, субъективно воспринимаемая человеческим глазом (видность) в зависимости от длины волны излучения.

Излучающий прибор, который всю свою энергию отдает в виде излучения с λ =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, p-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 p-n-перехода и зависит от слоя или места, в котором происходит рекомбинация носителей (p-n - переход,

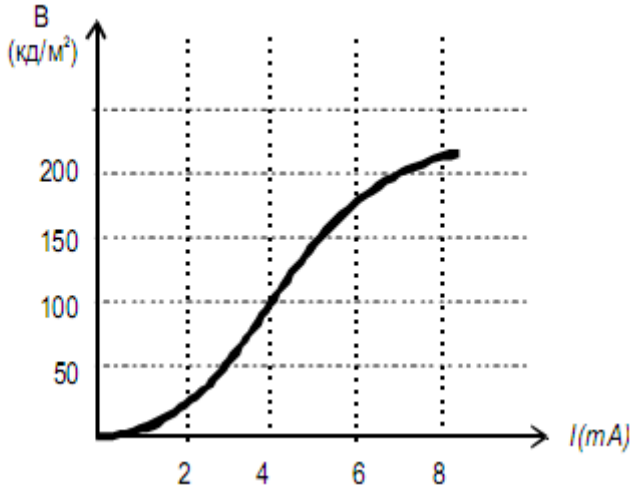


Рис. 7. Зависимость яркости излучения светодиода от тока p-n перехода.

сильнолегированная или слаболегированная область, прилегающая к p-n-переходу).

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

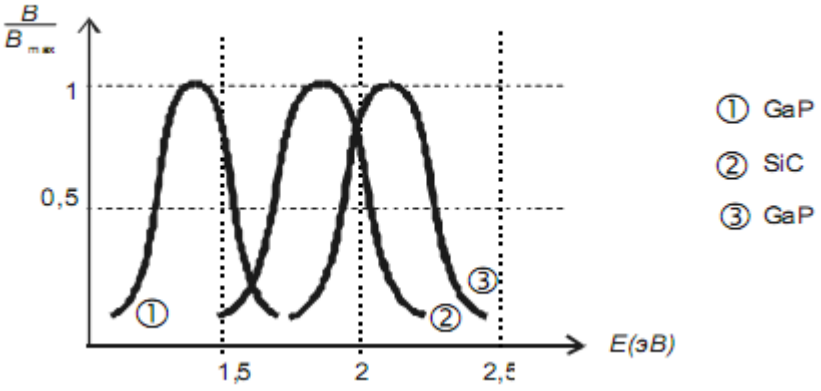


Рис. 8. Спектральные характеристики светодиодов, изготовленных из различных материалов.

Вольтамперная характеристика светодиода аналогична ВАХ обычной диодной структуры p-n перехода рис. 9.

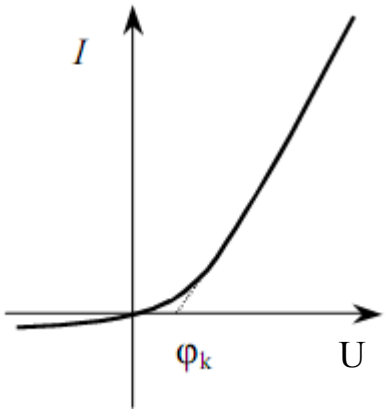


Рис. 9. Идеализированная ВАХ светодиода. $\varphi_к$ - контактная разность потенциалов p-n перехода, отождествляемая с «напряжением включения» светодиода, определяемая как точка пересечения продолжения линейного участка ВАХ с осью U.

Полупроводниковые лазеры.

Полупроводниковый лазер – это излучающий полупроводниковый прибор, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии или энергии некогерентного излучения в энергию когерентного излучения.

В полупроводниковых лазерах или ОКГ (оптический квантовый генератор) излучение, так же, как и в светодиодах, порождается рекомбинацией электронов и дырок. Однако, в отличие от светодиодов, эта рекомбинация вынужденная. Излучение при вынужденной рекомбинации получается когерентным.

Для преобладания вынужденной рекомбинации над поглощением квантов света необходимо, чтобы верхние энергетические уровни были более заполнены электронами, чем нижние (реализуется состояние инверсии населенности).

Инверсную населенность можно создать:

1. С помощью инжекции носителей заряда при прямом включении p-n - перехода;
2. Путем электронного возбуждения (бомбардировка полупроводника пучком быстрых электронов);
3. С помощью оптической накачки;
4. Путем использования эффектов сильного электрического поля, то есть лавинного умножения носителей заряда или туннелирования электронов.

Наиболее интересным с практической точки зрения является первый тип создания инверсной населённости.

Конструкция и технология изготовления инжекционных лазеров.

Инверсную населенность в инжекционных лазерах с p-n-переходом можно получить, если одна из областей диодной структуры является вырожденной, то есть содержит большую концентрацию примеси.

При прямом включении p-n-перехода прямой ток состоит из двух составляющих – электронной и дырочной. Чем больший ток проходит через p-n переход, тем с большим запасом выполняется условие инверсной населенности.

Минимальный ток, при котором начинает преобладать вынужденная рекомбинация, называется пороговым током.

Если ток, проходящий через p-n-переход, больше порогового, то p-n переход является усиливающей средой для света, распространяющегося в плоскости p-n перехода. Число актов вынужденной рекомбинации можно увеличить, если обеспечить прохождение каждого кванта света несколько раз в плоскости p-n перехода. Для этого две противоположные грани монокристалла полупроводника делают строго параллельными и тщательно полированными.

Подобные действия обеспечивают (без металлизации) отражение от торцов до 35% квантов света в силу большого коэффициента преломления

полупроводникового материала.

После многократного отражения от полированных торцов и соответствующего многократного прохождения вдоль p-n перехода свет выходит из полупроводника (см. рис. 10, 11).

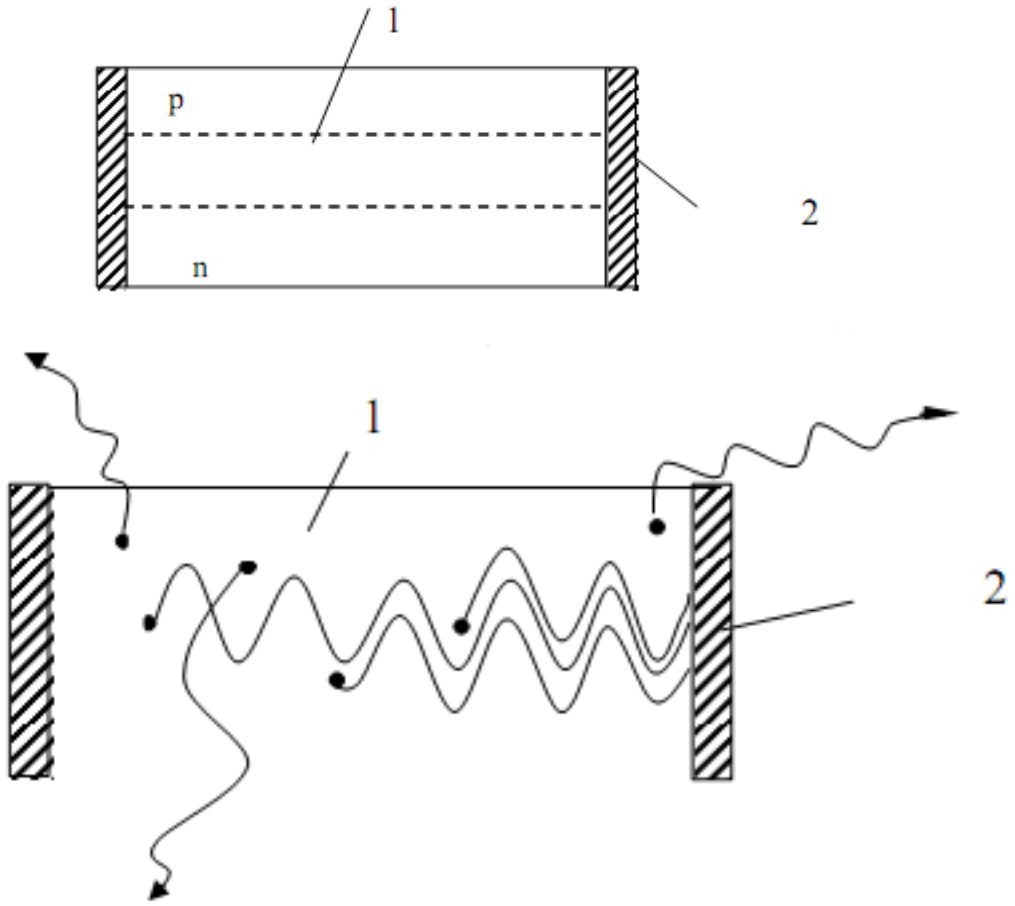


Рис. 10 Структура полупроводникового инжекционного лазера:

1 – активная область с инверсной населённостью;

2 – отражающие поверхности кристалла.

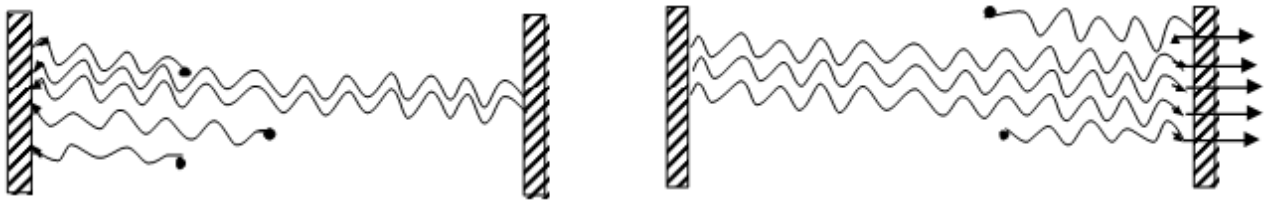


Рис. 11 Схема образования фотонной лавины в оптическом резонаторе

После многократного отражения от полированных торцов и соответствующего многократного прохождения вдоль p-n перехода свет выходит из полупроводника. Кванты света, двигающиеся строго перпендикулярно торцам кристалла, могут много раз пройти через активную область с инверсной населенностью и тем самым создать большую лавину квантов света. Две другие грани должны быть скошены под углом, чтобы воспрепятствовать возникновению генерации света между ними см. рис. 12.

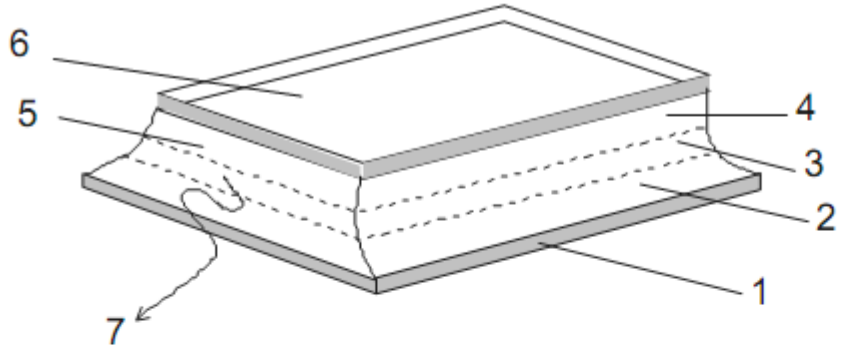


Рис. 12 . Конструкция полупроводникового инжекционного лазера

1 – нижний электрод (молибденовая пластина);

2 – область n-типа;

3 – активная область с инверсной населённостью;

4 – область p-типа;

5 – полированные торцы поверхности;

6 – верхний электрод.

Те кванты света, которые двигаются не вдоль p-n перехода и не перпендикулярно торцам кристалла, уходят из активной зоны и не вызывают вынужденной рекомбинации.

Для изготовления инжекционных лазеров используют GaAs, твердые растворы $GaAs_xP_{1-x}$, InAs, InP и другие полупроводниковые материалы.

Наибольшее распространение получили инжекционные лазеры на основе GaAs. В качестве исходной заготовки для таких лазеров служит монокристалл GaAs в форме куба или параллелепипеда со сторонами в несколько десятых долей миллиметра.

В GaAs n-область создается легированием Te, Se и другими; p-область создается легированием Zn, Cd и другие. Концентрация доноров и акцепторов в соответствующих областях должна быть такой, чтобы реализовывалось состояние, близкое к вырождению.

Для создания невыпрямляющего контакта с n-областью монокристалл с

диодной структурой припаивают к пластине молибдена, покрытой слоем золота. На поверхность р-области наносят сплав золота с серебром.

Базовую область такой структуры делают из полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны и большей диэлектрической проницаемостью, чем у эмиттерных областей. Инжектированные в базу носители заряда оказываются в потенциальных ямах. Различие показателей преломления базовых и эмиттерных областей приводит к полному внутреннему отражению квантов света на гетеропереходах, то есть область базы по существу является световодом.

Основные характеристики и параметры полупроводниковых лазеров.

1. Пороговая плотность тока ($j_{пор}$).

$j_{пор}$ зависит от температуры инжекционного лазера.

Для лазеров на основе GaAs:

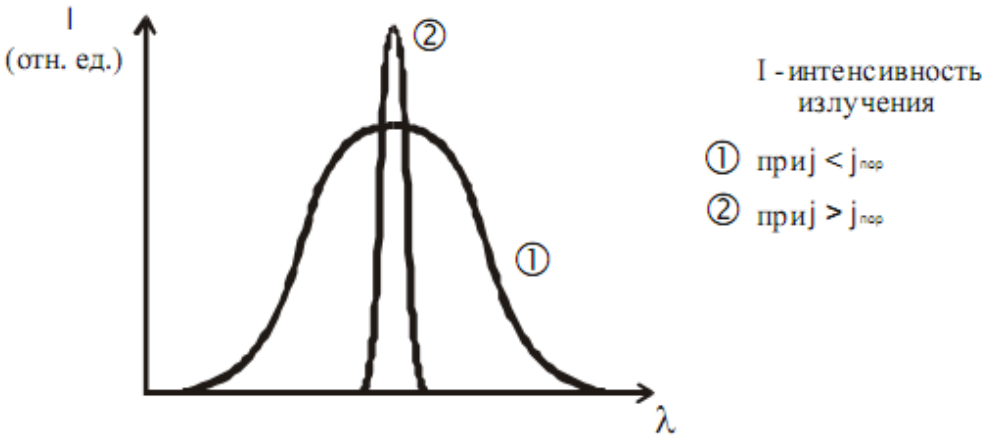
$j_{пор} = 10^2 A/см^2$ при T = 4,2 K;

$j_{пор} = 10^4 A/см^2$ при T = 77 K.

Следовательно, для уменьшения $j_{пор}$ необходимо глубокое охлаждение инжекционного лазера.

Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов имеют $j_{пор}$ значительно меньшие и могут работать при $T_{комн}$ в непрерывном режиме.

2. Спектральная характеристика лазера..



Если $j < j_{пор}$, излучение возникает, в основном, из-за самопроизвольной рекомбинации и является некогерентным. Лазер ведет себя как светодиод. Если $j > j_{пор}$, излучение когерентно и строго направлено.

3. Диаграмма направленности излучения лазера. Характеризует пространственное распределение интенсивности излучения. Излучение полупроводниковых лазеров обладает малым углом расходимости светового пучка.

4. КПД лазера. КПД инжекционного лазера на основе GaAs приблизительно равен 70% при величине квантового выхода 100%.

5. Яркостная характеристика лазера.

Зависимость интенсивности излучения от проходящего через лазер тока Рис. 15 .

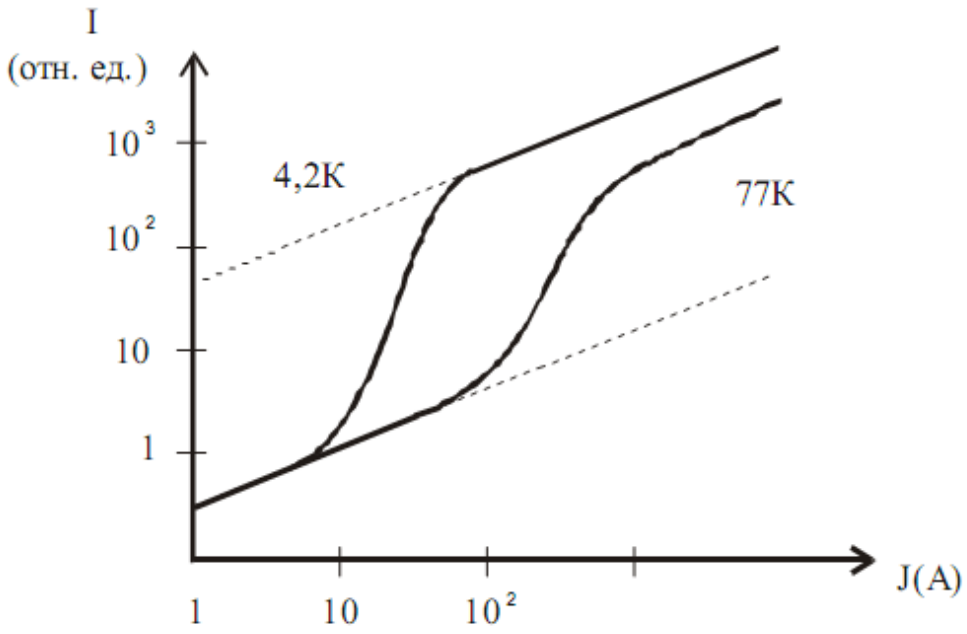


Рис. 15 . Зависимость интенсивности излучения от проходящего через лазер на основе GaAS тока при различных T

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.
Методика проведения эксперимента.

В данной работе применяется измерительный стенд для быстрого определения постоянной Планка с использованием светодиодов и полупроводникового лазерного диода, излучающих в разном спектральном диапазоне.

Планк утверждает что энергия кванта $E=h\nu$, где ν - частота излучения, а h – постоянная величина. Значит, $h=\frac{E}{\nu}$. Но $\nu=\frac{c}{\lambda}$, где с – скорость света в вакууме, λ - длина волны света.

Таким образом, получаем:

$$h=\frac{E\lambda}{c} \qquad (2.1)$$

Энергия фотона E выделяемая при излучении численно равна работе A совершённой электрическим полем над атомом при переводе его в возбуждённое состояние, т. е. $E=A_{эл.поля}$ Процесс возбуждения атома связан с переходом электрона с одного энергетического уровня на другой.

Из всей огромной совокупности свойств светодиодов рассмотрим лишь те, которые позволяют понять, почему энергия излучаемых фотонов может быть определена не только по формуле Планка, но и через макропараметры тока в электрической цепи со светодиодом: $E = Uq_e$, где $q_e=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл — модуль заряда электрона. Для того чтобы электрон мог совершить переход в разрешенное состояние с более высокой энергией, он должен приобрести в электрическом поле энергию, равную ширине запрещенной зоны. Энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле, составляет $\boldsymbol{q_eU}$.

Действие светодиода основано на принципе обратимости процессов в квантовом микромире. Если в зону проводимости каким-либо способом «накачать» избыточные электроны и одновременно обеспечить возможность их беспрепятственного перехода в валентную зону (это - межзонная рекомбинация), то при каждом акте электронного перехода в кристалле будет рождаться фотон с энергией, равной изменению энергии электрона, т. е. равной E. В этом случае задача по определению h сведется к нахождению энергии необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости.

В данной работе предлагается следующий способ. Известно что светодиоды — источники относительно спектрально чистого излучения. Подавая на светодиод напряжение прямого смещения, снижают потенциальный барьер p - n-перехода - начинается инжекция, накачка электронов в n-область. Каждый электрон, «взбираясь» на потенциальный барьер, берет от источника питания почти ровно столько же энергии, сколько он потом при рекомбинации передает фотону.

При прямом напряжении не только понижается потенциальный барьер, но также уменьшается и его сопротивление в прямом направлении. Становится

малым: от единицы до десятка Ом.

Поскольку высота барьера при отсутствии внешнего напряжения составляет несколько десятых долей вольта, то для значительного понижения барьера и существенного уменьшения сопротивления запирающего слоя достаточно подвести к *n—p* переходу такое же прямое напряжение (доли вольта), что приведёт к резкому возрастанию тока. Особенно важно, что при некотором прямом напряжении можно вообще уничтожить потенциальный барьер в *n – p* - переходе. Тогда сопротивление перехода, т. е. запирающего слоя, станет близким к нулю и им можно будет пренебречь. Прямой ток в этом случае возрастет и будет зависеть только от сопротивления *n*- и *p* – области.

Значит, при создании ситуации разрушения потенциального барьера резко увеличивается ток при ничтожном изменении напряжения. Назовем напряжение, при котором это произойдет - пороговым напряжением «включения» светодиода $\varphi_к$. Для не излучающего обычного p-n перехода полупроводникового диода напряжение $\varphi_к$ обычно называют контактной разностью потенциалов (см. рис. 9).

Используя его можно определить энергию, необходимую для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости для *n—p* перехода:

$$A_{эл.поля} = \varphi_k \cdot q_e \qquad (2.2)$$

В дальнейшем, при обратном переходе эта энергия выделяется в виде энергии фотона E.

Таким образом, получаем основную расчетную формулу, используемую в данной работе:

$$h = \frac{\varphi_k q_e \lambda}{c} \qquad (2.3)$$

где q_e=1,6·10^{-19} Кл — модуль заряда электрона, c=3·10^{8} м/с – скорость света в вакууме, λ — длина волны излучения светодиода (за длину волны излучения принимается длина волны λ_{max} соответствующая максимуму спектральной характеристики светодиода), $\varphi_к$ — контактная разность потенциалов излучающего p-n перхода («напряжение включения»), за которую принимается продолжение линейного участка вольтамперной характеристики светодиода до пересечения с осью U (см. рис. 9).

Приборы и оборудование.

Измерительный стенд представляет собой набор светодиодов с длинами волн: 410 нм, 450 нм, 540 нм, 580 нм и лазерный диод с λ=650 нм, источник стабилизированного тока и цифровой комбинированный измерительный прибор (вольтметр и миллиамперметр).

Исследование проводится на лабораторной установке ФКЛ-20, принципиальная блок-схема которой приведена на рис. 16.

Рис. 16. Упрощенная блок схема экспериментальной установки для исследования светодиодов и определения постоянной Планка ФКЛ-20

Стабилизированное напряжение от источника постоянного тока ***E*** подаётся через делитель «НАПРЯЖЕНИЕ СВЕТОДИОДА» подаётся на исследуемую схему. Необходимый светодиод подключается к схеме при помощи специальной перемычки типа «тюльпан — тюльпан». При этом один контакт перемычки соединяется с выводом XS1 установки, второй контакт соответственно с выбранным светодиодом XS2 – XS3 – XS4 – XS5 либо XS6 (согласно схеме рис. 16).

Установка снабжена микропроцессорной системой управления на базе однокристальной микроЭВМ. Длина волны излучения подключенного светодиода отображается на LCD ЖКД индикаторе совместно с измеренными значениями напряжения на светодиоде и тока через светодиод. Плавным вращением ручки регулировки «НАПРЯЖЕНИЕ СВЕТОДИОДА», снимается вольтамперная характеристика излучающего p-n перехода *I=f(U)* и одновременно визуально наблюдается возбуждение свечения электролюминесценции.

Порядок выполнения.

1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств.
2. Включите лабораторный модуль в сеть ~220 В.
3. Перевести переключатель СЕТЬ на панели установки в положение «ВКЛ» при этом должен загореться соответствующий сигнальный светодиод «СЕТЬ». Дать прибору прогреться не менее 5 минут.
4. Подключить к исследуемой схеме фиолетовый светодиод, соединив перемычкой выводы XS1 – XS2.
5. Записать длину волны излучения λ фиолетового светодиода, отображаемую на LCD ЖКД индикаторе.
6. Плавно вращая ручку «НАПРЯЖЕНИЕ СВЕТОДИОДА», снять вольтамперную характеристику светодиода *I=f(U)* записывая значения напряжения на p-n переходе и соответствующие этим напряжениям значения тока через светодиод.
7. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости *I=f(U)*.
8. Выбрать на графике линейный участок и продолжить его прямой линией до пересечения с осью напряжений U (см. рис. 17).

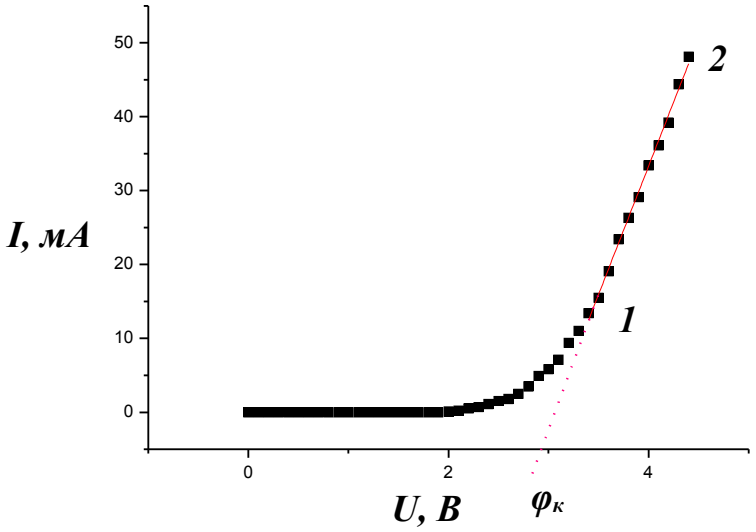


Рис. 17. Вид вольтамперной характеристики фиолетового светодиода, получаемой на учебной установке ФКЛ-20.

9. Определить точку пересечения прямой линии с осью U и принять это значение за контактную разность потенциалов излучающего p-n перехода («напряжение включения»). Для повышения точности измерений рекомендуется воспользоваться методом наименьших квадратов (см. приложение) для аппроксимации линейного участка 1 — 2 кривой рис. 17. Тогда полученная линейная функция *y(x)=a+bx* будет определять ВАХ светодиода на участке 1 — 2, где y=I – ток светодиода, x=U – напряжение

на светодиоде. Точка пересечения x_0 прямой с осью U будет определяться из уравнения $0=a+bx_0$, $x_0=-\frac{a}{b}$. Полученное выражение позволяет наиболее точно оценить контактную разность потенциалов $\varphi_к$ как $\varphi_k=-\frac{a}{b}$, где a и b — оценочные коэффициенты полученные методом наименьших квадратов.

10. Определить постоянную Планка по формуле (2.3).
11. Подключить к схеме синий светодиод, соединив перемычкой выводы XS1 – XS3 и проделать действия аналогичные пп. 5 — 10.
12. Подключая поочередно к схеме другие светодиоды и лазерный диод, снять их вольтамперные характеристики и оценить постоянную Планка согласно пп. 5 — 10.
13. По результатам всех опытов вычислить среднее значение постоянной Планка <h> и сравнить его с табличной величиной $h=6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с.
14. По окончании работы отключить установку от сети, поставив переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Приведите примеры оптоэлектронных приборов.
2. Что называется электролюминесценцией?
3. Приведите примеры схем излучательных и безизлучательных переходов в полупроводнике.
4. Приведите типы взаимодействия между фотонами и электронами в твердом теле.
5. Что такое квантовая эффективность люминесценции?
6. Укажите основные методы возбуждения электролюминесценции.
7. Что такое внутренний и внешние квантовые выходы полупроводникового светоизлучающего p-n перехода?
8. Нарисуйте график спектральной чувствительности глаза (видности).
9. Зарисуйте спектральные характеристики светодиодов, изготовленных из различных материалов.
10. Что такое полупроводниковый лазер?
11. Расскажите о конструкции и технологии изготовления инжекционных лазеров.
12. Приведите основные характеристики и параметры полупроводниковых лазеров.
13. Расскажите о методике проведения эксперимента и способе оценки значения постоянной Планка, используемого в данной работе.
14. Выведите основную расчетную формулу (2.3).

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)

Рассмотрим случай совместных измерений двух величин β и α. Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения β и α в результате многократных измерений некоторых других величин x_i и y_i получится линейная система условных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$y_i = \beta x_i + \alpha \qquad (1)$$

где x_i, y_i - результаты i-го измерения величин x и y; β и α - искомые величины.

Система уравнений (1) будет, вообще говоря, несовместна, так как результаты измерений x и y неизбежно содержат погрешности. Поэтому из этих уравнений можно определить только оценки величин β и α (соответственно B и A), которые являются случайными величинами.

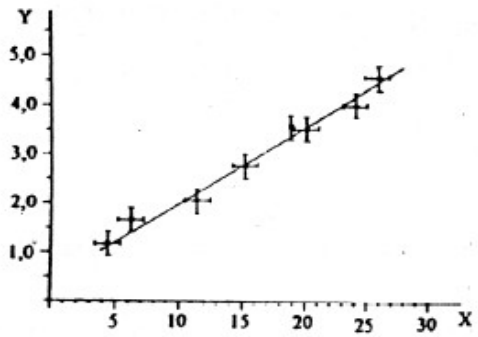


рис.1

Для наглядности изложения представим все опытные данные x_i и y_i на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения α и β состоит в определении параметров некоторой прямой: значения ординаты при нулевом значении абсциссы и тангенса угла наклона соответственно.

Так как между точками на графике можно провести не одну прямую, возникает задача - провести прямую наилучшим образом. Такая прямая характеризуется наиболее точными оценками коэффициентов β и α, т.е. наиболее вероятным.

Оценка β (значение B) определяется выражением

$$B = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}$$

Оценка α (значение A) определяется выражением $A = \overline{y} - B\overline{x}$

Можно показать, что оценка стандартного отклонения коэффициента B выражается следующим образом:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - Bx_i - A)^2}{(n-2)\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}}$$

Интервал, в котором с установленной вероятностью α_0 может находиться коэффициент β, записывается в виде $\Delta B = t_{\alpha_0,(n-2)} \cdot S_B$

Тогда можно записать: $\beta = B \pm \Delta B$

Стандартное отклонение коэффициента A определяется по формуле

$$S_A = \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{\overline{x}^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}\right)\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - Bx_i - A)^2}{n-2}}$$

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»