

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И. Кузбных, Н.С. Несмелов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
И ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ**

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
211000 Конструирование и технология электронных средств*

2014

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВЕДЕНИЕ.....	3
2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СВЕТОДИОДОВ.....	3
3 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СВЕТОДИОДОВ	6
3.1 Спектральная характеристика.....	6
3.2 Яркостно-токовая характеристика.....	8
3.3 Вольтамперная характеристика.....	9
3.4 Диаграмма направленности излучения.....	9
3.5 Основные параметры светодиодов.....	10
4 КОНСТРУКЦИИ СВЕТОДИОДОВ.....	12
5 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	14
6 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	15
7 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ.....	16
7.1 Измерение ВАХ светодиода	16
7.2 Измерение спектра излучения светодиода.....	17
7.3 Измерение яркостно-токовой характеристики светодиода.....	17
7.4 Измерение диаграммы направленности излучения светодиода.....	18
8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	18
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	19
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Фотометрические и электрические параметры неко- торых типов светоизлучающих диодов.....	20
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Некоторые физические параметры полупроводников, используемых в светодиодах.....	21

1 ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды являются широко используемыми в оптоэлектронике источниками некогерентного излучения. Цель настоящей работы познакомиться с физикой процессов в светодиодах, их конструкцией и основными характеристиками.

2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СВЕТОДИОДОВ

Светодиодом называется полупроводниковый прибор с p - n переходом или гетеропереходом, преобразующий электрическую энергию в световую. Преобразование энергии из одного вида в другой происходит в результате протекания в полупроводнике излучательной рекомбинации* носителей заряда.

В условиях теплового равновесия число актов излучательной рекомбинации равно числу актов поглощения квантов света равновесного теплового излучения. Поэтому полупроводник излучает ровно столько света (и на тех же частотах), сколько поглощает из окружающего пространства.

Для того чтобы излучение преобладало над поглощением, необходимо создать избыточную (над равновесной) концентрацию электронно-дырочных пар. Одним из наиболее удобных способов создания избыточных носителей заряда в полупроводнике является пропускание прямого тока через p - n переход. При этом возникает инжекция неравновесных носителей заряда в n -, p - области и в область объемного заряда p - n перехода.

Излучательная рекомбинация, возникающая при пропускании прямого тока через p - n переход, называется инжекционной электролюминесценцией.

Спектральный состав излучения светодиода и эффективность преобразования электрической энергии в световую определяются структурой энергетических зон полупроводника, типом и концентрацией примесей, а также конструкцией светодиода. Возможные виды излучательных переходов схематично показаны на рисунке 2.1.

Полное число излучательных переходов в единице объема в единицу времени при межзонной рекомбинации R пропорционально концентрациям электронов n и дырок p :

$$R = \gamma \cdot n \cdot p, \quad (2.1)$$

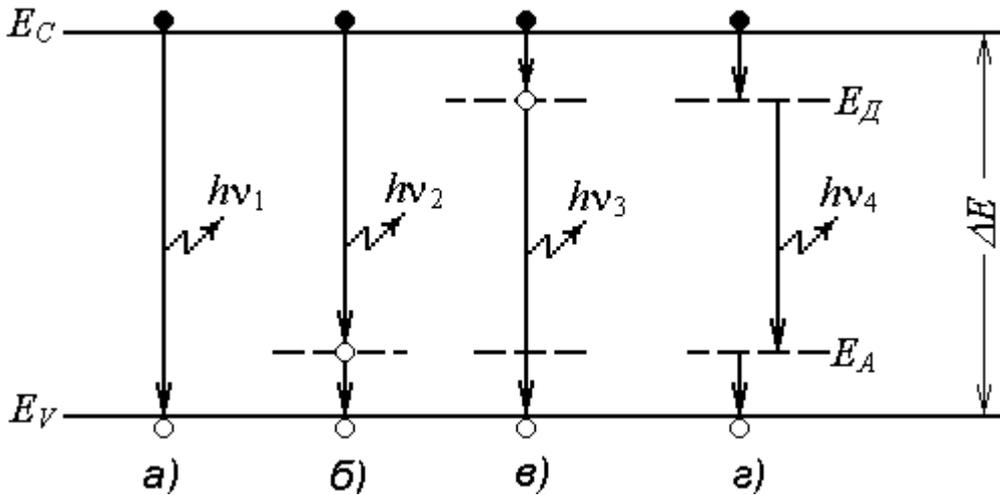
где γ - коэффициент рекомбинации.

Аналогичные выражения можно записать для интенсивности излучательной рекомбинации электронов на акцепторных уровнях и дырок на донорных уровнях

$$R_1 = \gamma_1 \cdot n \cdot N_A; \quad R_2 = \gamma_2 \cdot p \cdot N_D, \quad (2.2)$$

где N_A и N_D - концентрации акцепторных и донорных уровней, соответственно.

* *Рекомбинацией* называется переход электронов из зоны проводимости в валентную зону, в том числе через примесные уровни, который всегда сопровождается выделением энергии равной или превышающей ширину запрещенной зоны. Эта энергия полностью или частично может передаваться кристаллической решётке (безызлучательная рекомбинация) и выделяться в виде квантов света (излучательная рекомбинация). Светодиоды изготавливаются из полупроводниковых материалов ($GaAs$, GaP , $InSb$ и др.), для которых вероятность излучательной рекомбинации достаточно велика.



- а* – межзонная рекомбинация свободного электрона и дырки;
б – рекомбинация свободного электрона с акцептором;
в – рекомбинация свободной дырки с донором;
г – рекомбинация через связанные донорно-акцепторные пары;
 E_C – энергетический уровень дна зоны проводимости;
 E_V – энергетический уровень потолка валентной зоны;
 ΔE – ширина запрещённой зоны полупроводника;
 E_A, E_D – энергетические уровни акцепторов и доноров;
 $h\nu_i$ – фотон, испускаемый при соответствующем рекомбинационном переходе.

Рисунок 2.1 - Излучательные переходы в полупроводнике

Из формул (2.1) и (2.2) следует, что для усиления излучательной рекомбинации необходимо повышать степень легирования p -области акцепторной, а n -области донорной примесью.

Поскольку квазисвободные электроны и дырки занимают, в основном, энергетические уровни, находящиеся у дна зоны, соответственно, то энергия, которая может выделяться при межзонной рекомбинации электрона и дырки, преимущественно равна ширине запрещённой зоны полупроводника. Другими словами, интенсивность излучения будет иметь резкий максимум при значении:

$$h\nu = \Delta E, \quad (2.3)$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний электромагнитного излучения.

При излучательной рекомбинации электронов на акцепторных центрах, а также при рекомбинации через связанные донорно-акцепторные пары, энергия излучаемых фотонов будет меньше ширины запрещённой зоны полупроводника и равна, соответственно:

$$\begin{aligned}
 h\nu_1 &= \Delta E - \Delta E_A, \\
 h\nu_2 &= \Delta E - \Delta E_D, \\
 h\nu_3 &= \Delta E - \Delta E_A - \Delta E_D,
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

где ΔE – ширина запрещённой зоны полупроводника;

ΔE_A и ΔE_D – энергия ионизации акцепторной и донорной примесей.

Если в запрещённой зоне имеется несколько мелких примесных уровней, на которые или с которых возможны излучательные переходы электронов, то на

кривой спектральной зависимости интенсивности излучения светодиода будет наблюдаться столько же максимумов.

В отдельных случаях оказывается энергетически выгодным использовать двойное преобразование энергии: электрической энергии в инфракрасное излучение с последующим его преобразованием в видимый свет. Преобразование инфракрасного излучения в видимый свет осуществляется за счёт возбуждения инфракрасным излучением *антистоксова люминофора*, покрывающего излучающую поверхность диода.

Принцип действия антистоксова люминофора заключается в следующем (рисунок 2.2). Электроны люминофора переходят на уровень возбуждения E_B в результате поглощения двух или более инфракрасных фотонов $h\nu_{ИК}$, при возвращении на равновесный уровень E_P электроны испускают фотон, энергия которого превышает энергию возбуждающих фотонов. Очевидно, что при таком преобразовании квантовая эффективность светодиода уменьшается не менее, чем в два раза (см. формулу (3.4)).

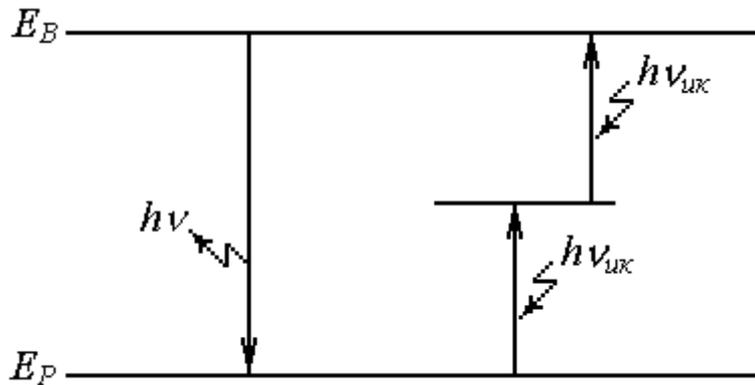


Рисунок 2.2 - Энергетическая диаграмма, поясняющая принцип работы антистоксова люминофора

Существенным недостатком светодиодов на основе *p-n* переходов при межзонной излучательной рекомбинации является сильное поглощение излучения внутри полупроводникового кристалла. Коэффициент поглощения – величина, обратная средней длине пробега фотона в материале, составляет около 10^4 см^{-1} . Для уменьшения потерь излучения на прямозонное поглощение используют различные методы, в том числе изготавливают светодиоды на основе *гетеропереходов* и *двойных гетероструктур*. На рисунке 2.3 приведено схематическое изображение изменения ширины запрещённой зоны ΔE двухслойной гетероструктуры с широкозонным окном. Внутреннее электрическое поле, обусловленное градиентом состава полупроводника *p*-типа, прижимает область рекомбинации к полупроводнику *n*-типа, имеющему большую ширину запрещённой зоны. Поскольку $\Delta E_{ОКНА} > h\nu$, то свет выводится через *n*-область без потерь на межзонное поглощение.

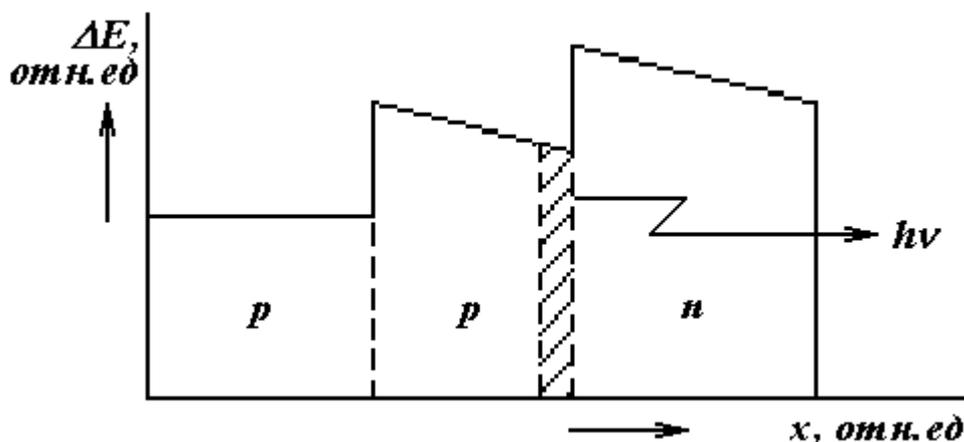


Рисунок 2.3 – Распределение ширины запрещённой зоны ΔE двухслойной гетероструктуры по оси x

Использование гетероструктур позволяет резко повысить эффективность преобразования электрической энергии в световую.

Если в полупроводнике имеются примеси или структурные дефекты, то доля излучательных переходов уменьшается, интенсивность свечения падает. Поэтому качество светодиодов в значительной мере зависит от степени очистки исходных материалов и совершенства технологии их изготовления и легирования. Основным технологическим методом изготовления светодиодов является метод эпитаксиального наращивания из жидкой или газообразной фазы.

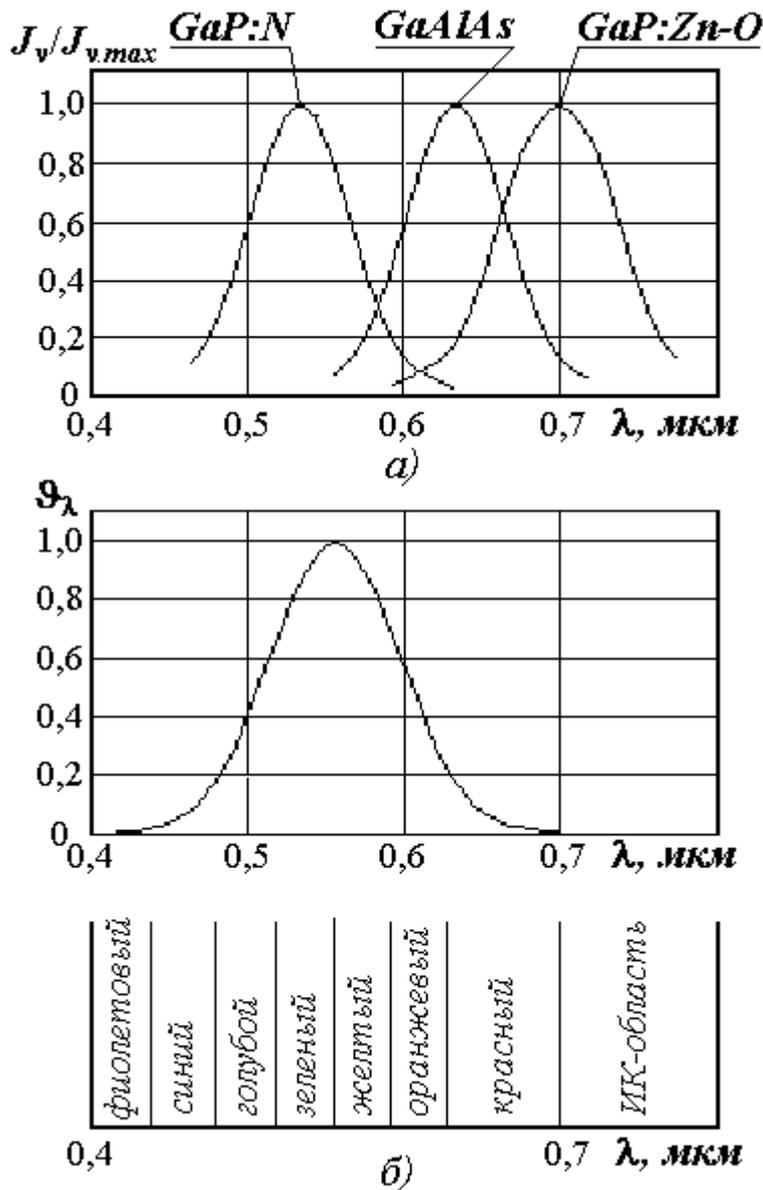
3 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СВЕТОДИОДОВ

Основные свойства промышленных светодиодов определяются спектральной, яркостно-токовой, вольтамперной характеристиками и диаграммой направленности излучения.

3.1 Спектральная характеристика

Спектральной характеристикой называется зависимость интенсивности свечения J_ν от длины волны излучаемого света λ . Зависимость даёт представление о цвете свечения прибора (рисунок 3.1). Светодиоды в зависимости от спектра излучения подразделяются на излучающие в видимой области спектра ($\lambda = 0,4 - 0,76$ мкм) и излучающие в инфракрасной области спектра ($\lambda > 0,76$ мкм).

На этом же рисунке приведена кривая видимости, т.е. кривая относительной чувствительности глаза ϑ_λ к излучению различных длин волн. Наибольшая чувствительность для нормальных (без дефектов зрения) глаз наблюдается на длине волны $\lambda = 0,555$ мкм. Одинаковое количество лучистой энергии других длин волн вызывает сравнительно меньшее зрительное ощущение. Свет с длинами волн, меньшими 0,4 мкм и большими 0,76 мкм, совершенно не вызывает зрительного ощущения вне зависимости от интенсивности.



$J_v/J_{v,max}$ – интенсивность свечения в относительных единицах;
 φ_λ – относительная чувствительность глаза;
 λ – длина волны излучения.

Рисунок 3.1 - Спектральные характеристики излучателей на основе некоторых полупроводниковых материалов (а) и кривая видности с указанием границ диапазонов цветности (б)

Спектр излучения характеризуется двумя параметрами: λ_{max} и $\Delta\lambda_{0,5}$.

λ_{max} – длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики светодиода. Для светодиодов с несколькими полосами излучения спектр излучения характеризуется $\lambda_{эфф}$, которая определяет интегральный цвет излучения.

$\Delta\lambda_{0,5}$ – полуширина спектральной линии – это интервал длин волн, в котором мощность излучения уменьшается наполовину от максимальной.

В настоящее время разработаны светодиоды с управляемым цветом свечения. Для создания таких светодиодов используется несколько способов:

- кристалл полупроводника с двумя $p-n$ переходами, каждый из которых излучает в различных участках спектра;
- кристалл полупроводника с одним $p-n$ переходом, содержащим легирующие примеси, рекомбинация через которые даёт две полосы излучения, причём зависимость интенсивности излучения в каждой полосе по различному зависит от величины прямого тока;
- двукристалльный светодиод с параллельным или независимым включением кристаллов и т.д.

Во всех этих случаях используется один принцип: смешение двух спектрально-чистых цветов с регулируемой интенсивностью (например, зелёного или красного) позволяет получить свечение любого промежуточного цвета в зависимости от соотношения интенсивностей исходных излучений.

3.2 Яркостно-токовая характеристика

Яркостно-токовая характеристика* – зависимость яркости свечения светодиода от величины проходящего через него прямого тока. Для светодиода видимой области спектра излучения типа АЛ 307 АМ яркостно-токовая характеристика приведена на рисунке 3.2. Для светодиодов инфракрасной области спектра вместо яркостно-токовой характеристики используется **мощностная характеристика** – зависимость мощности излучения $P_{изл}$, измеряемой в ваттах, от величины прямого тока, проходящего через диод.

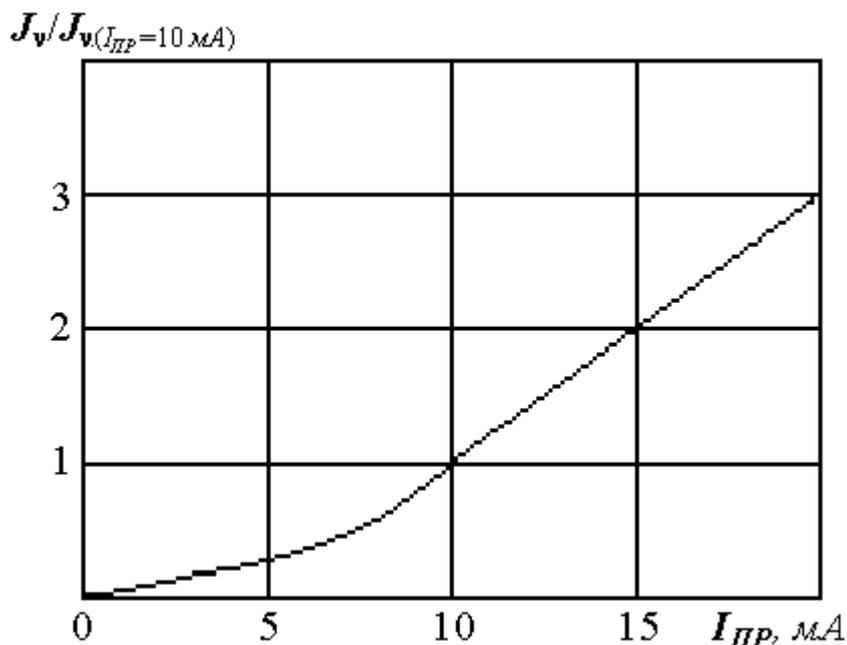


Рисунок 3.2 - Яркостно-токовая характеристика светодиода АЛ 307 АМ

* **Яркость** – величина, численно равная отношению силы света к площади светящейся поверхности, измеряется в канделах на квадратный метр, $кд/м^2$;

Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучаемого кристалла, измеряется в канделах.

3.3 Вольтамперная характеристика

Вольтамперная характеристика светодиода – зависимость прямого тока светодиода от приложенного напряжения $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$. На рисунке 3.3 приведена вольтамперная характеристика промышленного светодиода типа АЛ 307 ВМ. На рисунке показаны зоны разброса и усреднённая кривая, которая имеет вид, близкий к характеристике обычного диода. Нижний предел рабочего участка светодиода (пороговое напряжение) определяется энергией излучаемых квантов света (см. выражение (3.7)) и обычно лежит в интервале 1,5...2,2 В. Далее следует почти линейный рабочий участок. Верхний предел рабочего напряжения определяется допустимой мощностью рассеяния прибора.

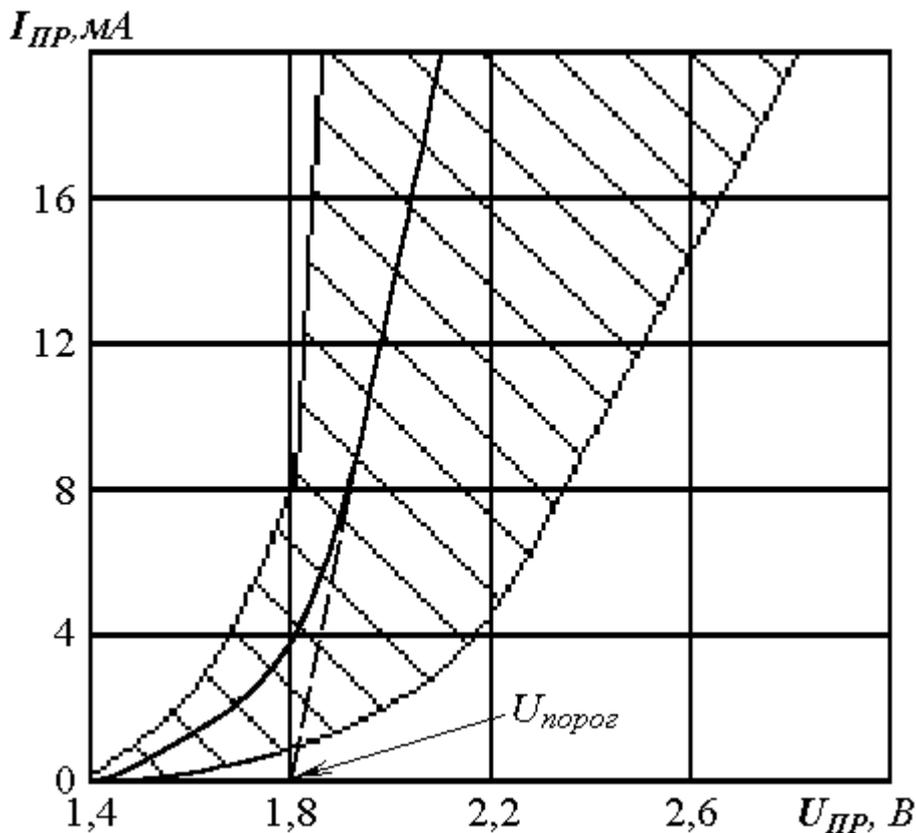
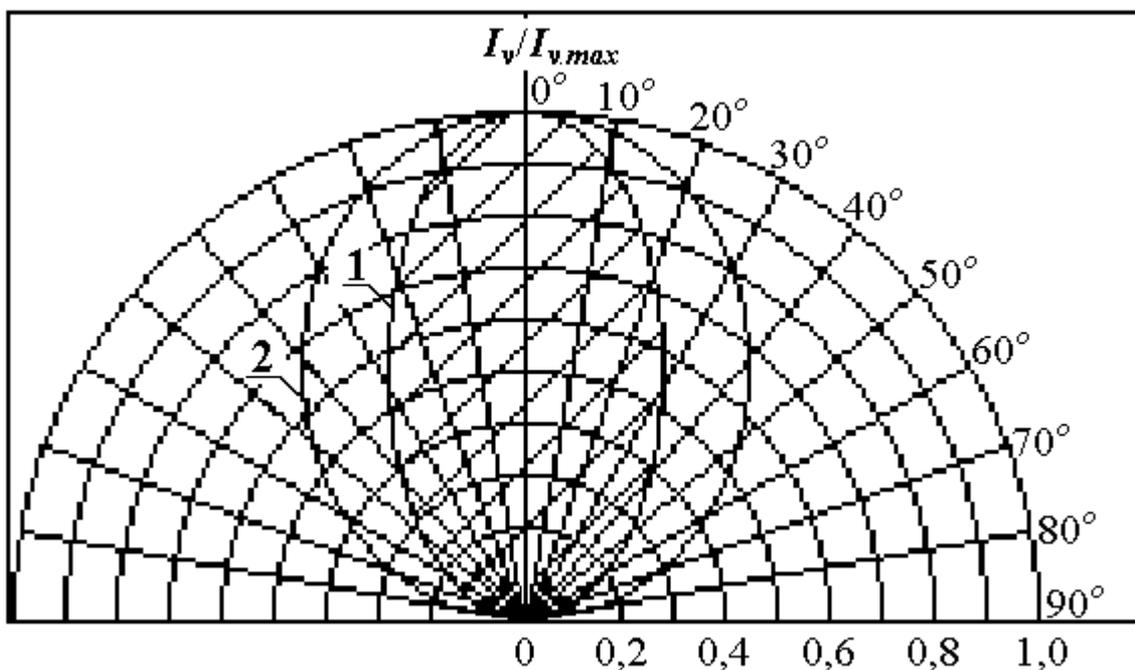


Рисунок 3.3 - Вольтамперная характеристика светодиода АЛ 307 ВМ

3.4 Диаграмма направленности излучения

Диаграмма направленности излучения – это зависимость силы света от угла относительно оси светодиода, под которым ведётся наблюдение излучения. Диаграмма направленности определяется конструкцией светодиода, наличием линз, оптическими свойствами материала и может быть узконаправленной (1) при сфокусированном излучении или широкой (2) при рассеянном излучении (рисунок 3.4).



1 – узконаправленная диаграмма, 2 – рассеянное излучение

Рисунок 3.4 - Диаграммы направленности излучения светодиодов

3.5 Основные параметры светодиодов

Часть параметров, характеризующих свойства светодиодов, были приведены выше. Кроме них к основным параметрам относятся:

$I_{пр.max}$ – **максимально допустимый постоянный прямой ток**, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

$I_{и.max}$ – **максимально допустимый импульсный прямой ток**, при котором обеспечивается заданная надёжность при длительной работе;

$P_{изл}$ – **мощность излучения**, измеряемая в милливаттах, *мВт*;

$P_{изл.и}$ – **импульсная мощность излучения** – амплитуда светового потока, излучаемого в импульсе;

$U_{обр.max}$ – **максимально допустимое обратное напряжение**;

$T_{нр.изл}$ и $t_{сп.изл}$ – **время нарастания и время спада излучения** – интервал времени в момент включения или выключения напряжения, в течение которого мощность излучения диода меняется от 0,1 до 0,9 или от 0,9 до 0,1 своего максимального значения.

Следует отметить, что светодиоды обладают высоким быстродействием. Излучение нарастает и спадает за время порядка 10^{-8} с. С увеличением температуры сила света, в связи с уменьшением вероятности излучательных переходов, уменьшается, повышение концентрации носителей приводит к снижению падения напряжения на светодиоде, а уменьшение ширины запрещённой зоны полупроводника сопровождается сдвигом максимума спектра излучения в длинноволновую область. Зависимость яркости свечения светодиода от температуры оказывается практически линейной и в рабочем диапазоне температур (от минус 60 до +40 °С) яркость может изменяться в 2-3 раза.

Важнейшим рабочим параметром светодиодов является **коэффициент преобразования электрической энергии в световую (КПД)**, который определяется отношением выходной мощности люминесценции $P_{ВЫХ}$ к мощности, подаваемой на светодиод $P_{ВХ}$

$$КПД = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{N_{\Phi} \cdot h\nu}{I \cdot U}, \quad (3.1)$$

где N_{Φ} – число фотонов, излучаемых светодиодом в единицу времени;
 I, U – ток и напряжение на светодиоде, соответственно.

Учитывая, что

$$I = q \cdot N_B, \quad (3.2)$$

где q – заряд электрона; N_B – число электронов или дырок, прошедших через светодиод в единицу времени, получим

$$КПД = \frac{h\nu \cdot N_{\Phi}}{q \cdot U \cdot N_B}. \quad (3.3)$$

Величина

$$\eta = \frac{N_{\Phi}}{N_B} \quad (3.4)$$

носит название **внешней квантовой эффективности светодиода**. Поскольку часть генерированных в полупроводниковом кристалле фотонов задерживается в светодиоде вследствие поглощения и отражения от поверхностей, то внешняя квантовая эффективность светодиода всегда меньше **внутренней квантовой эффективности**, равной

$$\eta_B = \frac{N_{\Phi B}}{N_B}, \quad (3.5)$$

где $N_{\Phi B}$ – число фотонов, появляющихся внутри кристалла.

С учётом формулы (3.1) внешняя квантовая эффективность светодиода будет равна

$$\eta = КПД \cdot \frac{qU}{h\nu}. \quad (3.6)$$

В выражении (3.6) величина qU равна энергии, набираемой электроном в зоне проводимости полупроводника при движении в электрическом поле. Часть этой энергии электрон передаёт кристаллической решётке полупроводника в результате актов рассеяния и безызлучательных переходов, а часть энергии испускается в виде фотонов с энергией $h\nu$, генерируемых при излучательной рекомбинации.

Очевидно, что излучение в светодиоде может возникнуть только при выполнении условия, что

$$qU \geq h\nu, \quad (3.7)$$

где знак равенства соответствует маловероятному случаю, когда электрон не передаёт свою энергию кристаллической решётке.

Таким образом, внутренняя квантовая эффективность определяется свойствами полупроводника в области излучательной рекомбинации, а внешняя квантовая эффективность и коэффициент полезного действия являются пара-

метрами, отражающими не только свойства полупроводника, но и конструкцию светодиода. Для светодиодов внешняя квантовая эффективность может достигать нескольких процентов.

Параметры некоторых типовых светодиодов приведены в приложении А.

4 КОНСТРУКЦИИ СВЕТОДИОДОВ

Светоизлучающий диод состоит из кристалла полупроводника и элементов конструкции. Кристалл полупроводника состоит из электронно-дырочного перехода и омических контактов. Элементы конструкции предназначены для сбора излучения, увеличения внешней оптической эффективности, улучшения восприятия свечения и формирования необходимой диаграммы направленности излучения, а также для обеспечения электрического контакта с внешней цепью и удобного монтажа прибора в аппаратуре.

Требования к устройству и характеристикам светоизлучающих диодов определяются областями их применения, среди которых основными являются:

- 1) сигнальная индикация;
- 2) подсветка постоянных надписей меток на экране и шкалах;
- 3) отображение информации в цифровых измерительных приборах;
- 4) разнообразные функциональные применения: маркировка фотопленок, преобразователи механических величин, в устройствах контроля параметров веществ и материалов и пр.

В зависимости от области применения к светодиодам предъявляются различные требования к силе света, площади светящейся поверхности, виду диаграммы направленности и т.д.

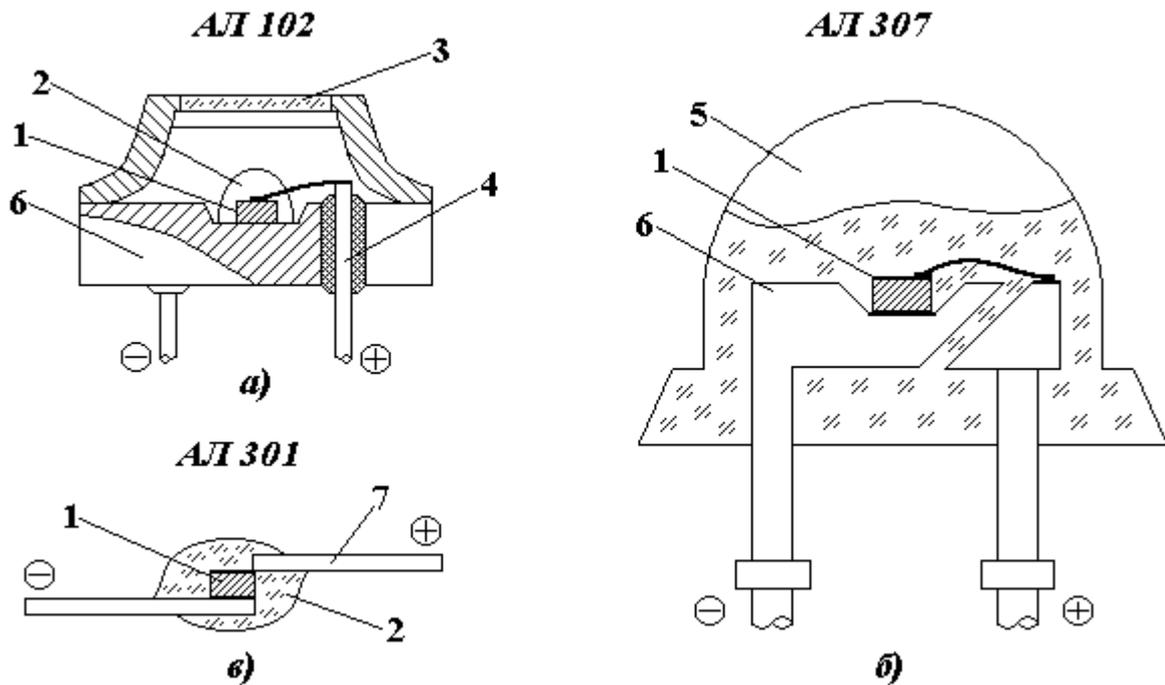
Общими требованиями для всех видов светодиодов являются:

- 1) низкие токи питания (5-10 мА) и малые входные напряжения (менее 3 В). Это требование обусловлено необходимостью обеспечения электрической совместимости светодиодов с интегральными микросхемами и минимизации рассеиваемой мощности, что позволяет увеличить плотность монтажа и снизить массогабаритные показатели приборов;
- 2) высокая надежность, большой срок службы, устойчивость к механическим и климатическим воздействиям;
- 3) высокая технологичность изготовления и низкая стоимость.

Выпускаемые промышленностью светоизлучающие диоды по конструкции могут быть разделены на следующие группы:

- 1) в металлостеклянном корпусе (рисунок 4.1, а);
- 2) на основе металлостеклянной ножки или рамочного держателя с полимерной герметизацией (рисунок 4.1, б);
- 3) бескорпусные диоды (рисунок 4.1, в) – самые малогабаритные.

Кристаллодержатель светодиода (см. рисунок 4.1, позиция б) содержит, как правило, посадочное место для кристалла с отражающими свет стенками. Отражающие стенки в значительной степени сужают диаграмму направленности излучения и увеличивают силу света в осевом направлении в 1,5...3 раза (рисунок 4.2).



1 - кристалл; 2 - полимерная защита; 3 - баллон со стеклянным окном; 4 - металлоглазненная ножка; 5 - полимерная линза; 6 - держатель; 7 - гибкий золотой вывод

Рисунок 4.1 – Конструкции некоторых типов светодиодов

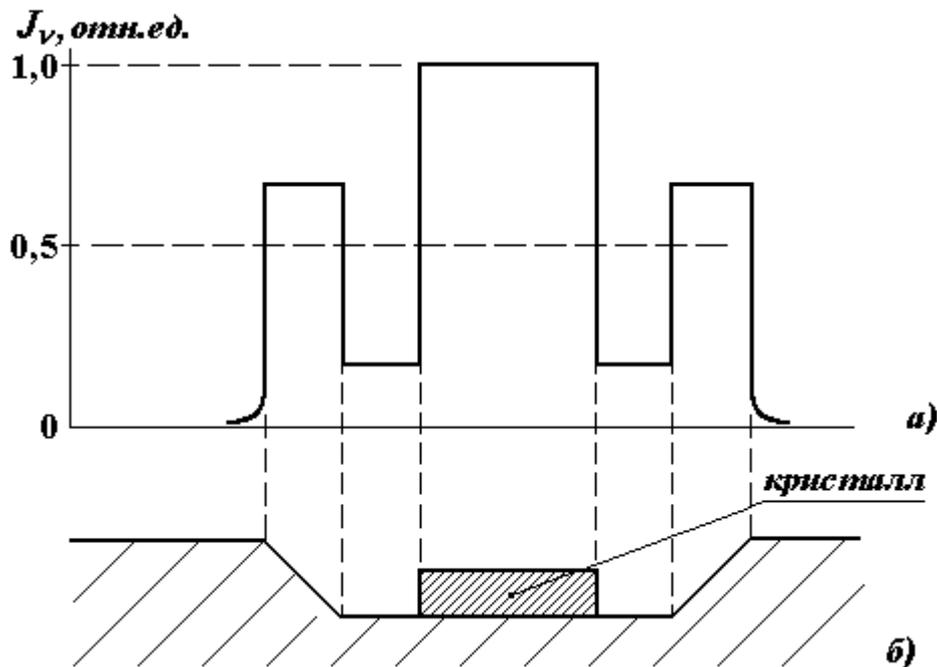
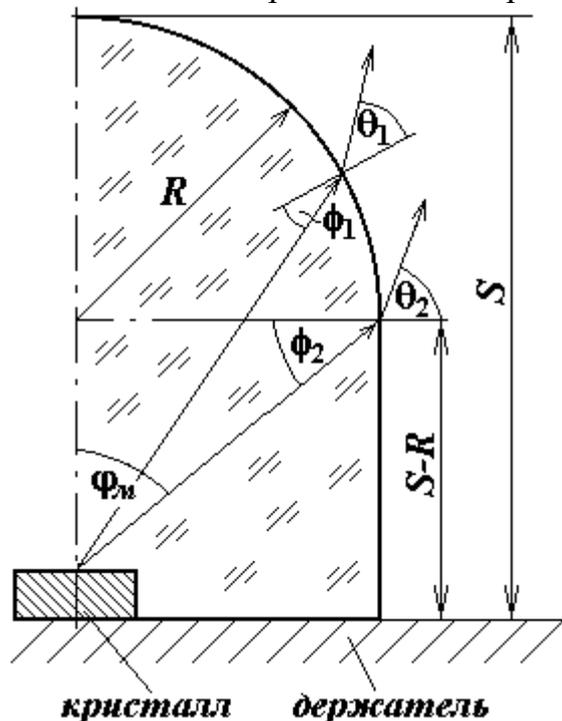


Рисунок 4.2 – Распределение яркости по кристаллодержателю светодиода (а), содержащему посадочное место с отражающими свет стенками (б)

Значительное перераспределение светового излучения, формирование направленного светового потока и повышение к.п.д. светодиодов (в 3-4 раза) часто осуществляют с помощью полимерной линзы. Такой же эффект достигается при формировании одной из областей $p-n$ -структуры полупроводника в виде усеченной сферы (сфера Вейерштрасса) или усеченного эллипсоида (рисунок 4.3). При этом световыводящей поверхности светодиода придают такую форму,

при которой подавляющее большинство лучей падает на неё под углом к нормали меньше критического, что позволяет снизить потери света на полное внутреннее отражение. Для уменьшения потерь света на обычное отражение на поверхность кристалла наносят антиотражающие покрытия.



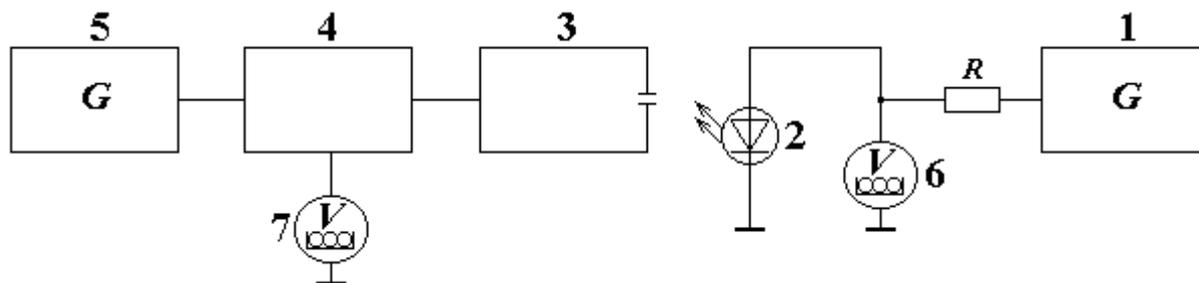
R - радиус полусферы; S - высота полимерного купола; ϕ и θ – углы падения и отклонения светового луча; ϕ_m – максимальный угол вывода излучения по отношению к оси прибора

Рисунок 4.3 – Ход световых лучей в полимерном куполе светодиода

5 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для измерения основных характеристик светодиодов используется лабораторная установка, состоящая из лабораторного макета со светодиодом, установки для регистрации излучения, источника питания светодиода и измерительных приборов. Структурная схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.1. Она включает в себя:

- 1 - стабилизированный источник питания постоянного тока и напряжения типа Б5-44, предназначенный для питания светодиода;
- 2 - исследуемый светодиод;
- 3 - монохроматор;
- 4 - фотоприемник излучения исследуемого светодиода;
- 5 - блок питания фотоприемника излучения;
- 6 - универсальный цифровой вольтметр типа В7-22А (или другого типа), предназначенный для измерения напряжения на светодиоде ($U_{\text{пр}} \leq 2 \text{ В}$);
- 7 - универсальный цифровой вольтметр типа В27-35 (или другого типа), предназначенный для измерения напряжения, пропорционального световому потоку исследуемого светодиода ($U_{\text{пр}} \leq 5 \text{ В}$).



1 - блок питания светодиода; 2 - исследуемый светодиод; 3 - монохроматор;
4 - приемник излучения; 5 – блок питания к приемнику излучения;
6, 7 – вольтметры цифровые; R - резистор согласующий

Рисунок 5.1 – Структурная схема лабораторной установки

6 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1 Ознакомиться с лабораторной установкой и устройством лабораторного макета. Подготовить протокол с таблицами для регистрации результатов исследований.

6.2 Изучить методики измерения характеристик светодиода и проверить правильность подключения элементов установки. На лицевой панели источника питания 1 (рисунок 5.1) установить минимальные значения напряжения и тока. Получить разрешение преподавателя на выполнение работы, включить установку для прогрева.

6.3 Измерить прямую вольтамперную характеристику светодиода (см. рекомендации в 7.1). Результаты измерений внести в таблицу 6.1. Построить ВАХ $I_{\text{ПР}}(U_{\text{ПР}})$ и определить предельное напряжение $U_{\text{ПРЕД}}$.

Таблица 6.1 – Результаты измерений прямой ВАХ светодиода

$I_{\text{ПР}}, \text{мА}$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	4	6	10	15	20	
$U_{\text{ПР}}, \text{В}$	0											

6.4 Настроить монохроматор и измерить спектральную характеристику светодиода $V_{\lambda}(\lambda)$ (см. рекомендации в 7.2). Результаты измерений внести в таблицу 6.2. Построить спектральную характеристику светодиода $(V_{\lambda}/V_{\lambda.\text{max}})(\lambda)$.

Таблица 6.2 – Результаты измерений спектральной характеристики светодиода

$\lambda, \text{нм}$											
$V_{\lambda}, \text{мВ}$											
$V_{\lambda}/V_{\lambda.\text{max}}$											

6.5 Измерить яркостно-токовую характеристику светодиода согласно рекомендациям, приведенным в пункте 7.3. Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 6.3 и построить яркостно-токовую характеристику (характеристики при нескольких максимумах).

Таблица 6.3 – Результаты измерений яркостно-токовой характеристики

$I_{ПР}, mA$	0	1	2	3	...	...	10	...	...	19	20
V_{J}, mB											
\bar{J}							1				

6.6 Измерить диаграмму направленности светодиода согласно рекомендациям, приведенным в пункте 7.4. Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 6.4 и построить диаграмму направленности светодиода.

Таблица 6.4 – Результаты измерений диаграммы направленности

$\varphi, град$	...	...	-10	-5	-2	0	2	5	10	...	...
U_{J}, mB											
$U_{J}/U_{J,max}$						1					

6.7 На основании сравнительного анализа результатов проведенных исследований и технических характеристик светодиодов, приведенных в приложении А, определить тип исследуемого светодиода.

6.7 Определить величину энергии кванта излучения в максимуме спектральной характеристики и полуширину спектральной линии в электронвольтах. По результатам измерений и данных о ширине запрещенной зоны полупроводника светодиода (приложение Б) оценить глубину залегания примесного уровня или суммарную глубину залегания примесных уровней, через которые происходят, излучательные переходы в светодиоде. Привести энергетическую диаграмму излучательных переходов, обнаруженных в светодиоде.

6.9 На основе измерений (пункт 6.6 и рисунок 3.4) сделать вывод о характере диаграммы направленности светодиода.

6.10 На основе измеренных яркостно-токовой и вольтамперной характеристик определить пороговое напряжение светодиода и обосновать физический смысл этой величины, опираясь на результаты измерений спектра излучения.

7 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ

7.1 Измерение ВАХ светодиода

Для измерения вольтамперной характеристики исследуемого светодиода 2 (рисунок 5.1) используются универсальный блок питания 1 и цифровой вольтметр 6. Блок питания предварительно переводится в режим *стабилизации тока* путем снижения напряжения (не более 30 В). При этом должна загореться сигнальная лампочка режима стабилизации «ТОК». Через светодиод пропускается прямой постоянный ток $I_{ПР}$, величина которого устанавливается с помощью переключателей на лицевой панели блока питания 1. Величина напряжения на светодиоде $U_{ПР}$ измеряется цифровым вольтметром 6. Измерения прово-

дятся при изменении прямого тока светодиода от 1 до 20 мА (через 1 мА). Результаты измерений I_{PP} и U_{PP} заносятся в таблицу и по ним строится вольтамперная характеристика светодиода $I_{PP}(U_{PP})$.

7.2 Измерение спектра излучения светодиода

Перед снятием спектральной характеристики светодиода проверяют установку монохроматора 3 и приемника излучения 4 на оптической оси – направляющие светового потока должны находиться на одной линии. Устанавливается “0” приемника излучения 4 – контроль по вольтметру 7.

На источнике питания светодиода 6 в режим *стабилизации тока* устанавливается прямой ток $I_{PP} = 10$ мА (для светодиода зеленого свечения АЛ307ВМ $I_{PP} = 20$ мА). Светодиод устанавливают перед входной щелью монохроматора и настраивают монохроматор на длину волны излучения светодиода. После того, как будет зафиксирован отклик приемника излучения на свечение диода (определяется по изменению показаний вольтметра 7), проводят подстройку положения светодиода перед входной щелью монохроматора, добиваясь максимальных показаний фотоприемника – максимальное показание вольтметра 7.

После установки светодиода на оптической оси монохроматора измеряют зависимость выходного сигнала фотоприемника V_λ от длины волны излучения λ . При этом в окрестности максимума излучения длину волны, пропускаемой монохроматором, изменяют через 1...5 нм и находят значение длины волны λ_{max} , при котором показание прибора будет максимальным $V_{\lambda,max}$. Для некоторых типов светодиодов возможны два максимума. Данные измерений заносят в таблицу и по ним строят спектральную характеристику светодиода в координатах

$$\frac{V_\lambda}{V_{\lambda,max}} = f(\lambda), \quad (7.1)$$

где V_λ – показание вольтметра приемника излучения на длине волны λ ;

$V_{\lambda,max}$ – показание вольтметра приемника излучения при *глобальном* максимуме на длине волны λ_{max} .

7.3 Измерение яркостно-токовой характеристики светодиода

Не нарушая настройки установки (светодиод должен находиться на оптической оси монохроматора (см. пункт 7.2)), устанавливают длину волны, соответствующую максимальному сигналу фотоприемника $V_{\lambda,max}$ – $\lambda = \lambda_{max}$. Измеряют зависимость интенсивности (яркости) свечения J (V_J) от величины прямого тока через диод I_{PP} . Величину прямого тока рекомендуется изменять через 1 мА в интервале от 0 до 20 мА. По результатам измерений рассчитывается относительная величина интенсивности свечения светодиода \bar{J} по формуле (7.2). Данные измерений и расчетов вносятся в таблицу и по ним строится яркостно-токовая характеристика $\bar{J} = f(I_{PP})$.

$$\bar{J} = \frac{J}{J_{10mA}} = \frac{V_J}{V_{J(10mA)}}, \quad (7.2)$$

где \bar{J} – относительная величина интенсивности свечения светодиода; J – интенсивность свечения светодиода; J_{10mA} – интенсивность свечения светодиода при токе $I_{ПП} = 10 \text{ mA}$; V_J и $V_{J(10mA)}$ – показания вольтметра 7, пропорциональные интенсивности свечения светодиода J и J_{10mA} , соответственно.

В том случае, если спектр излучения светодиода имеет два максимума, измерения яркостно-токовой характеристики проводят отдельно для каждого спектрального максимума. На основании измеренных яркостно-токовых характеристик сделать вывод о возможности изменения цвета свечения светодиода при увеличении прямого тока.

7.4 Измерение диаграммы направленности излучения светодиода

Перед измерениями проводится настройка установки – юстировку светодиода. Светодиод размещают так, чтобы он находился на пересечении оптической оси монохроматора и перпендикулярной к ней оси вращения площадки, на которой расположен узел крепления светодиода, чтобы светодиод можно было вращать в плоскости, параллельной оптической оси. Положение светодиода, при котором показание вольтметра 7 (рисунок 5.1) максимально будет соответствовать углу поворота $\varphi = 0$ относительно оптической оси. Оно должно быть зафиксировано на поворотном механизме. После юстировки измеряют зависимость интенсивности излучения светодиода (напряжения вольтметра 7) при $\lambda = \lambda_{max}$ от угла поворота светодиода φ (влево и вправо относительно оптической оси). Шаг изменения угла поворота φ и предельные значения его определяются экспериментально, Результаты измерений вносят в таблицу 6.4. По ним рассчитывают относительные значения интенсивности излучения светодиода \bar{I} по формуле (7.3). результаты вносят в таблицу 6.4 и строят диаграмму направленности излучения в полярных координатах (см. рисунок 3.4)

$$\bar{I} = \frac{I}{I_{max}} = \frac{U_I}{U_{I,max}} = f(\varphi), \quad (7.3)$$

где $U_{I,max}$ – напряжение (показание вольтметра 7), пропорциональное интенсивности излучения светодиода при $\varphi = 0$;

φ – угол поворота светодиода вокруг осевой линии подставки относительно оптической оси.

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1 Объясните принцип работы светодиода.

7.2 Почему для создания светодиодов, работающих в заданном оптическом диапазоне длин волн, необходимо, как правило, использовать полупроводники, у которых ширина запрещенной зоны больше энергии фотона для этого диапазона длин волн?

- 7.3 Объясните принцип работы антистоксова люминофора?
- 7.4 Какие виды излучательных переходов используются в светодиодах?
- 7.5 Чем гетеропереход отличается от *p-n*-перехода, преимущества гетероструктур при их использовании в светодиодах?
- 7.6 Назовите основные характеристики светодиодов.
- 7.7 Перечислите области применения светодиодов.
- 7.8 За счет каких конструктивных решений можно повысить к.п.д. светодиодов?
- 7.9 Из каких физических соображений определяется пороговое напряжение включения светодиода?
- 7.10 Какие физические принципы могут использоваться для создания светодиодов с управляемым цветом излучения?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Светоизлучающие диоды и их применение. – М.: Радио и связь, 1988.- 79 с.
- 2 Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. - 208 с.
- 3 Иванов Е.В, Аксенов В., Юшин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 448 с.
- 4 Гада Н.Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники / Под ред. С.В.Свечникова. – М.: Радио и связь, 1981. - 368 с.
- 5 Несмелов Н.С., Кузевных Н.И. Исследование характеристик светодиодов: Методические указания по выполнению лабораторной работы. – Томск: ТУСУР, 2007. – 20 с.
- 6 Кузевных Н.И. Физика функциональных устройств: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 152 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Тип прибора	Прямой ток, <i>мА</i>	Исходный материал	Конструкция	Цвет свечения и длина волны λ_{max} , <i>нм</i>	Средняя сила света, <i>мкД</i>	Постоянное прямое напряжение, <i>В</i> , не более	Угол излучения, <i>град</i>
АЛ 102 А	5	<i>GaP:Zn,O</i>	Металло-стеклянный корпус	Красный, 700	0,1	–	–
АЛ 102 В	20	<i>GaP:N</i>	То же	Зеленый, 565	0,3	–	–
АЛ 307 ВМ	10	<i>Ga_{0,7}Al_{0,3}As</i>	Полимерная герметизация	Красный, 670	2,0	2,0	40
АЛ 307 В	20	<i>GaP:N</i>	То же	Зеленый, 565	0,4	2,8	40
АЛ 307 ГМ	20	–/–	То же	То же	2,5	2,8	–
АЛ 307 ДМ	10	<i>GaP:N,O</i>	То же	Желтый, 580	0,4	2,8	40
АЛ 307 ЕМ	10	–/–	То же	То же	2,0	2,5	–
2Л 101 А	–	<i>SiC</i>	Без корпуса	Желтый, 590	0,15	–	5,0
АЛ 336 Б	10	<i>GaAlAs</i>	Полимерный	Красный, 660	45	2,0	10
АЛ 336 Г	10	<i>GaP:N</i>	То же	Зеленый, 565	15	2,8	15

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СВЕТОДИОДАХ

Параметры	<i>GaAs</i>	<i>GaP</i>	<i>InP</i>
Ширина запрещенной зоны, при $T = 300\text{ K}$, эВ	1,428	2,27	1,34
Диэлектрическая проницаемость: статическая, высокочастотная	13,1	11,1	12,4
	11,0	9,1	9,5
Температура плавления, °C	1237	1467	1058
Подвижность носителей заряда при $T=300\text{ K}$, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$: электронов, дырок	до 8500	до 190	до 4600
	до 400	до 150	до 150
Характер оптического перехода в точке $K=0$	прямой	непря- мой	прямой
Постоянная решетки, Å	5,65	5,45	5,86
Показатель преломления	3,5	3,3	3,1