

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

#### ВВЕДЕНИЕ

В 1923 г. русский ученый Лосев О.В. обнаружил, что при прохождении тока через кристаллы карборунда наблюдается зеленоватое свечение. Позднее это явление было связано с излучательной рекомбинацией в р-п-переходах при инжекции носителей тока через р-п-переход. При приложении к р-п-переходу напряжения в прямом направлении инжектируемые носители (электроны и дырки), попадая в область кристалла, где они не являются основными, рекомбинируют с основными носителями. Межзонные переходы, как правило, сопровождаются испусканием квантов света с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны. На основе этого явления и было создано новое семейство приборов - светоизлучающих диодов (СД).

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ ДИОД (СД, Light-emitting diode -LED) - полупроводниковый прибор с одним или несколькими потенциальными барьерами, преобразующий электрическую энергию в энергию электромагнитного излучения на основе явления инжекционной электролюминесценции.

В настоящее время полупроводниковые светоизлучающие диоды получили широкое применение в различных областях светотехники. Ещё недавно светодиоды были всего лишь устройствами индикации, а сегодня это уже высокоэффективные источники света. Высокий интерес к этим полупроводниковым приборам проявляется в связи с их уникальными характеристиками и достоинствами. Низкое потребление электроэнергии, большой срок службы (до 100 000 часов), узкий спектр монохроматического излучения, возможность получения практически любых оттенков света, высокая светоотдача, миниатюрность, экологичность, широкий диапазон рабочих температур, высокая электробезопасность – вот те преимущества, которыми обладают светоизлучающие диоды (СД), по сравнению с традиционными источниками оптического излучения.

Выпускаемые сегодня светодиоды имеют достаточно узкий энергетический спектр излучения, что позволяет отнести их к т.н. спектральным источникам света. Цвет излучаемого света зависит только от ширины запрещенной зоны активной области, в которой рекомбинируют электроны и дырки, то есть, от материала полупроводника, и от легирующих примесей.

Основные современные материалы, используемые в кристаллах светодиодов:

- GaN, InGaN – синие, зеленые и ультрафиолетовые светодиоды высокой яркости;
- AlGaInP – желтые, оранжевые и красные светодиоды высокой яркости;
- GaAs, AlGaAs – красные и инфракрасные светодиоды;
- GaP – желтые и зеленые светодиоды, и др. материалы.

Устройство светодиода упрощенно представлено на Рис.1. Свет, излучаемый полупроводниковым кристаллом, попадает в миниатюрную оптическую систему, образованную сферическим рефлектором и самим прозрачным корпусом диода, имеющим форму линзы. Изменяя конфигурацию рефлектора и линзы, устанавливая вторичные линзы, добиваются необходимой направленности излучения.

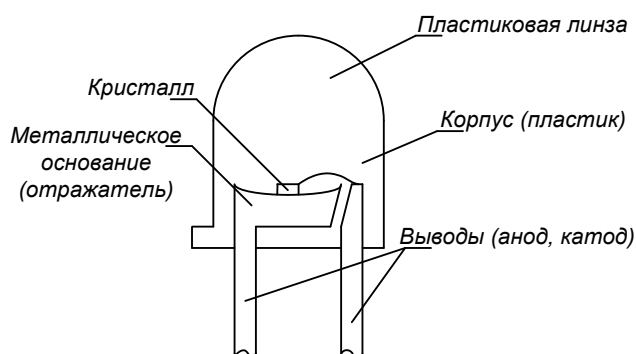


Рис.1 – Конструкция 5мм светодиода

Для создания светодиодов белого свечения в настоящее время используют несколько способов. Один из них – смешение излучения СД трёх или более цветов. На Рис.2, а) показано получение белого света путем смешивания в определённой пропорции излучения красного, зелёного и синего светодиодов (так называемый полноцветный СД). В принципе такой способ должен быть наиболее эффективным. Для каждого из СД – красного, зелёного или голубого – можно выбрать значения тока, соответствующие максимуму его внешнего квантового выхода излучения. Но при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для синтеза белого цвета. Этого можно достигнуть, изменяя число диодов каждого цвета и составляя источник из многих диодов. Для практических применений этот способ неудобен, поскольку нужно иметь несколько источников различного напряжения, много контактных вводов и устройства, смешивающие и фокусирующие свет от нескольких СД. Второй и третий способы – смешение голубого излучения СД с излучением либо жёлто-зелёного люминофора, либо зелёного и красного люминофоров, возбуждаемых этим голубым излучением. На Рис. 2, б) показано получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесённого на него слоя жёлтого люминофора. Эти способы наиболее просты и в настоящее время наиболее экономичны. Состав кристалла с гетероструктурами на основе InGaN/GaN подбирается так, чтобы его спектр излучения соответствовал спектрам возбуждения люминофоров. Кристалл покрывается слоем геля с порошком люминофора таким образом, чтобы часть голубого излучения возбуждала

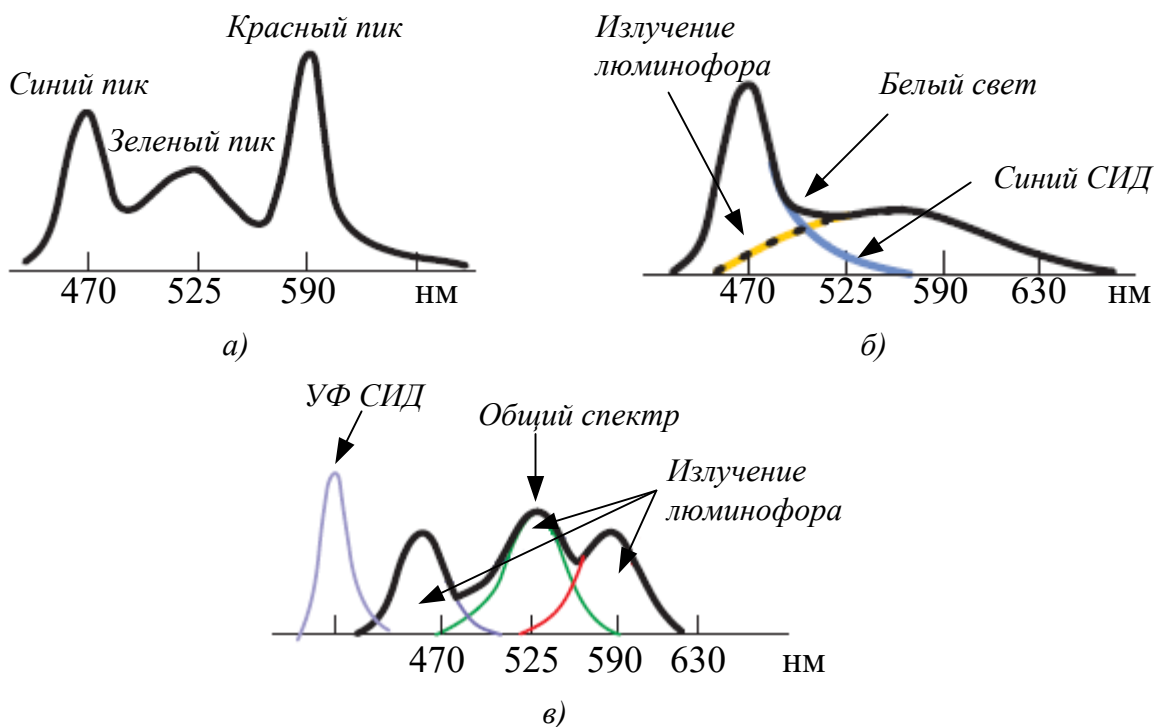


Рис.2. Получение белого света а) путём смешивания излучения красного, зелёного и синего светодиодов; б) с помощью кристалла синего светодиода и слоя жёлтого люминофора; в) с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора

люминофор, а часть – проходила без поглощения. Форма держателя, толщина слоя геля и форма пластикового купола рассчитываются и подбираются так, чтобы излучение имело белый цвет в нужном телесном угле. Четвертый способ – смешение излучения трёх люминофоров (красного, зелёного и голубого), возбуждаемых ультрафиолетовым светодиодом. На Рис.2, в) показано получение белого света с помощью ультрафиолетового светодиода и RGB-люминофора. Этот способ использует технологии и материалы, которые разрабатывались в течение многих лет для люминесцентных ламп. Он требует только два контактных ввода на один излучатель. Но этот способ связан с принципиальными потерями энергии при преобразовании света от диода в люминофорах. Кроме того, эффективность источника излучения уменьшается, т.к. разные люминофоры имеют разные спектры возбуждения люминесценции, не точно соответствующие УФ-спектру излучения кристалла СД. Светоотдача белых СД ниже, чем светоотдача СД с узким спектром, поскольку в них происходит двойное преобразование энергии, часть её теряется в люминофоре.

Светоизлучающие диоды классифицируют по значению рассеиваемой мощности:

- СД малой мощности (до 100 мВт),
- СД средней мощности (0,1 – 1 Вт),
- мощные СД (более 1 Вт).

Мощные светодиоды выделяют большее количество тепла в активной области, поэтому излучающие кристаллы СД помещаются в корпуса, обладающие эффективным теплоот-

водом. Такие корпуса изготавливают из материалов, обладающих высоким коэффициентом теплопроводности, например из алюминия или меди.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СД

В СД при протекании через кристалл постоянного или переменного тока в область полупроводника (активную область),

инжектируются избыточные носители заряда – электроны и дырки (Рис.3); их

рекомбинация сопровождается оптическим излучением. Спектральные свойства излучения характеризуются длиной волны ( $\lambda_{max}$ ), соответствующей максимуму спектральной плотности потока излучения полупроводникового излучателя.

Длина волны излучения зависит от свойств полупроводникового материала и может находиться в ультрафиолетовом, видимом или инфракрасном диапазонах спектра.

Качество излучающего диода характеризуется внешним квантовым выходом

$$\eta_{ext} = \gamma \cdot \eta_i k_o \quad (1)$$

где  $\gamma$  – эффективность инжекции электронов в активную область,  $\eta_i$  – внутренний квантовый выход,  $k_o$  – оптическая эффективность или коэффициент вывода излучения.

Произведение  $\gamma \cdot \eta_i$  определяет эффективность инжекционной люминесценции. Однако даже при большом значении  $\gamma \cdot \eta_i$  внешний квантовый выход может оказаться малым вследствие низкого вывода излучения из структуры диода во внешнюю среду. Это обусловлено тем, что при выводе излучения из активной области кристалла имеют место следующие потери энергии:

1) потери на самопоглощение. При поглощении полупроводником фотонов их энергия может быть передана электронам валентной зоны с переводом этих электронов в зону проводимости. Возможно поглощение энергии фотонов свободными электронами зоны проводимости или дырками валентной зоны. При этом энергия фотонов расходуется также на перевод носителей на более высокие для них энергетические уровни, но в пределах соответствующей разрешенной зоны. Возможно примесное поглощение фотонов, при котором их энергия идет на возбуждение примесных уровней. Кроме того, в полупроводниках может происходить поглощение фотонов кристаллической решеткой, поглощение с переходом электронов с акцепторного на донорный энергетический уровень и другие виды поглощения.

2) потери на полное внутреннее отражение. При падении излучения на границу раздела оптически более плотной среды (полупроводник) с оптически менее плотной (воздух) для

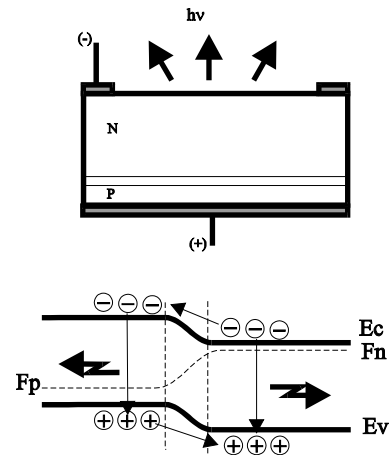


Рис. N-3. Схематическое изображение кристалла; инжекция и рекомбинация в p-n-переходе

частиц излучения выполняется условие полного внутреннего отражения (Рис.4). Эта часть излучения, отразившись внутри кристалла, в конечном счёте теряется за счет самопоглощения.

Излучение, падающее на поверхность раздела под углом  $\theta$ , превышающим критический угол  $\theta_{кр}$ , претерпевает полное внутреннее отражение; при  $\theta < \theta_{кр}$  излучение частично отражается от непросветленной поверхности. Это френелевские потери. Для полупроводников показатель преломления обычно близок к 3,5, а критический угол для лучей, падающих из области р-п-перехода на границу кристалл – воздух  $\theta_{кр} = \arcsin(1/n)$ , составляет (14-16)°. Если на поверхность полупроводника нанести диэлектрическую пленку с соответствующими значениями толщины и показателя преломления, то она будет оказывать просветляющее действие, и коэффициент пропускания увеличится; критический угол при этом практически не изменится.

3) потери на обратное и торцевое излучение. Генерация в активной области полупроводника спонтанная и характеризуется тем, что лучи направлены равновероятно во все стороны. Излучение, распространяющееся в сторону эмиттера, быстро поглощается.

4) потери, связанные с поглощением излучения в металлических контактах.

5) поверхностные потери на френелевское отражение излучения, падающего на границу раздела под углом, меньшим критического.

Активная область нередко слегка отличается значением показателя преломления от соседних областей. Поэтому излучение вследствие многократных отражений фокусируется вдоль активной области, так что интенсивность торцевого излучения выше, чем в других направлениях выхода из кристалла.

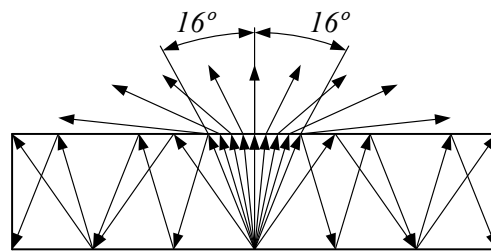


Рис.4. Полное внутреннее отражение лучей в кристалле полупроводника

Эффективность выхода оптического излучения из кристалла характеризуется коэффициентом,  $k_o$  и определяется отношением мощности выходящего излучения ( $P_o$ ) к мощности излучения ( $P_g$ ), генерируемого внутри кристалла

$$k_o = P_o/P_g \quad (2)$$

Таким образом, внешний квантовый выход  $\eta_{ext}$  – это интегральный показатель излучательной способности СД, который учитывает эффективность инжекции  $\gamma$ , электролюминесценции  $\eta_i$  и вывода излучения в создании оптического излучения.

Для получения высоких значений коэффициента выхода оптического излучения СД используют ряд мер:

1) применение специальных антиотражающих (просветляющих) покрытий с целью снижения френелевского отражения на границе раздела полупроводник – воздух.

2) изготовление кристаллов с определенной геометрией для снижения внутренних оптических потерь, например, кристаллы с меза-структурой, кристаллы в форме усеченной пирамиды или сферы Вейерштрасса.

3) уменьшение площади верхних контактов в кристалле с целью увеличения выхода излучения из активной области. Поскольку сопротивление контактов непосредственно связано с их площадью, площадь верхнего контакта нельзя уменьшать до бесконечности. Верхний контакт в светодиоде, как правило, имеет круглую форму и диаметр 100 мкм. Для более равномерного распределения тока над всей площадью активной области напыляют дополнительные контакты в виде тонких полос. На Рис. N-5 показаны верхние контакты различной формы.

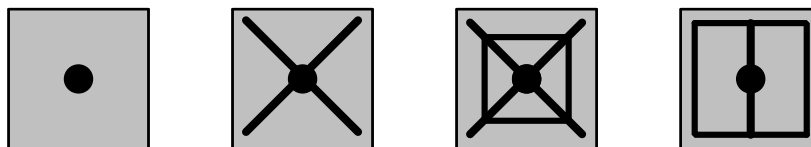


Рис.5. Примеры верхних контактов

4) для светодиодов с двумя верхними контактами используется так называемая флип-чип технология монтажа (перевернутый кристалл). При использовании этой технологии, металлические контакты не препятствуют выводу освещения из активной области.

5) применение полупроводниковых материалов с текстурированной поверхностью для уменьшения внутреннего отражения в кристалле.

Основными этапами «революционного» повышения внешнего квантового выхода и, следовательно, световой отдачи, следует считать:

- применение n-p- гетероперехода – достигается односторонняя инжекция электронов (и суперинжекция), а также «эффект окна» для вывода излучения через широкозонный полупроводник;

- применение двойной n-p-n гетероструктуры (ДГС) – достигается т. наз. «электронное ограничение», значительно увеличивается концентрация инжектированных неосновных носителей заряда в активной области, длина которой ограничена широкозонными полупроводниками;

- применение ДГС с квантовыми ямами (одна или, преимущественно несколько) – наряду с ещё большей концентрацией инжектированных неосновных носителей заряда в активной области (в квантовой яме малой длины) проявляются изменения зонной структуры и волновой функции, приводящие к повышению скорости рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

### Вольтамперные характеристики светодиодов

Поскольку светодиод в общем случае представляет собой прибор с р-п-переходом, то его вольтамперная характеристика будет *описываться* выражением

$$J = J_p + J_n = J_s \left( e^{eU/kT} - 1 \right), \quad (3)$$

где

$$J_s = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n}. \quad (4)$$

Выражение (3) представляет собой формулу Шокли [6], описывающую вольтамперную характеристику идеального р-п-перехода.

На Рис.6 приведена вольтамперная характеристика реального р-п-перехода, здесь же пунктиром показана характеристика идеального р-п-перехода. Рассмотрим основные причины, приводящие к отличию характеристик.

При прямом напряжении на р-п-переходе (область 1) отклонение реальной характеристики от идеальной связано с конечным (не нулевым) сопротивлением слаболегированной области базы (и контактов)  $R_a$ . Часть внешнего напряжения  $U$  падает на этом сопротивлении  $R_a$ , поэтому напряжение на р-п-переходе уменьшается до величины  $U - IR_a$ . С учетом сопротивления базы, прямой ток реального р-п-перехода описывается уравнением:

$$J = J_s \left( e^{e(U-IR_a)/nkT} - 1 \right), \quad (5)$$

Где  $n$  – коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики диода. Для идеальных диодов он равен 1. Для реальных диодов величина этого коэффициента лежит в диапазоне 1,1 – 1,5. Однако для полупроводников на основе арсенидов и фосфидов он может быть равен 2, а для GaN/InGaN-диодов  $n = 6$  (В связи с тем, что здесь структура активной области представляет собой несколько последовательно включённых двойных гетероструктур).

При обратном напряжении обратный ток реального перехода оказывается больше чем ток идеального перехода, и, кроме того, величина обратного тока зависит от обратного напряжения (область 2 на Рис.6). Причиной этого отличия является то, что в выражении (4) не учитывалась тепловая генерация в области объемного заряда. Вследствие малой концентрации носителей заряда в р-п-переходе скорость генерации пар носителей зарядов в этой области преобладает над скоростью рекомбинации; любая пара носителей заряда, генерируемая в этой области, разделяется полем перехода, а, следовательно, к тепловому току добавляется генерационная составляющая.

Величина тока генерации пропорциональна ширине р-п-перехода, а, следовательно, зависит от приложенного обратного напряжения.

При достаточно больших обратных напряжениях (область 3 на Рис. 6) в р-п-переходе может произойти пробой. Пробоем называется неограниченное увеличение тока при постоянном или даже уменьшающемся напряжении на р-п-переходе.

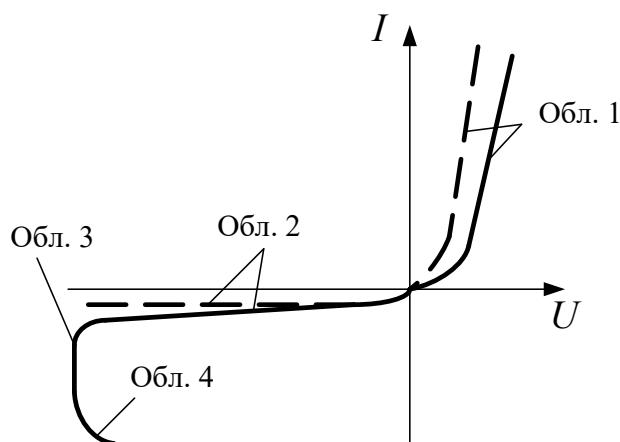


Рис.6. ВАХ реального диода

Различают три вида пробоя: лавинный, туннельный, тепловой.

Лавинный пробой (область 3, Рис.6) связан с возникновением ударной ионизации атомов полупроводника в области объемного заряда при высокой напряженности электрического поля. При больших обратных напряжениях процесс ударной ионизации лавинообразно нарастает, что приводит к увеличению обратного тока.

Туннельный пробой связан с туннельными переходами электронов сквозь узкий и высокий потенциальный барьер. Такой пробой возникает в р-п-переходах на базе сильнолегированных областей n- и р-типа.

Лавинный и туннельный пробоем обратимы, то есть при включении в цепь р-п-перехода ограничивающего ток сопротивления, эти виды пробоя не приводят к разрушению р-п-перехода.

Тепловой пробой (область 4, Рис.6) наступает при условии, когда выделяемая в р-п-переходе мощность оказывается больше, чем отводимая. В этом случае температура р-п-перехода лавинообразно возрастает, что в конечном счете приводит к необратимому разрушению р-п-перехода. Чтобы предотвратить тепловой пробой, необходимо улучшать теплоотвод от р-п-перехода.

Исследование вольтамперных характеристик СИД имеет большое практическое значение, поскольку по виду ВАХ можно определить некоторые важные параметры светодиода (Рис.7):

1) Напряжение отсечки – это напряжение, с которого начинается резкий рост тока и которое по величине примерно (с погрешностью  $\pm kT/e$ ) равно высоте потенциального барьера, через который происходит инжекция неосновных носителей заряда.



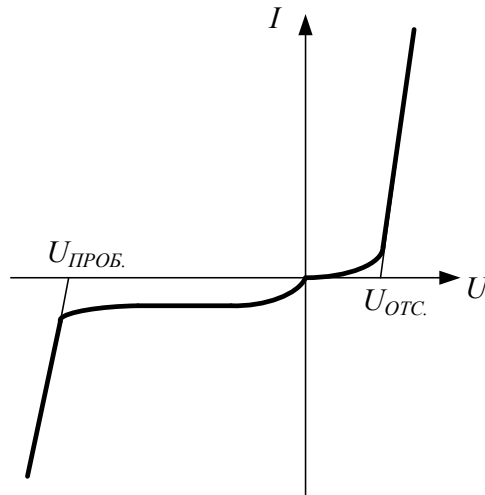


Рис.7. Определение  $U_{отс}$  и  $U_{проб}$  из вольтамперной характеристики диода

2) Напряжение пробоя – это значение обратного напряжения, при котором происходит пробой p-n-перехода СИД. Обычно производители в справочной документации указывают предельное обратное напряжение (преимущественно 5 В), больше которого нельзя подавать на диод. Это напряжение обычно много меньше напряжения пробоя.

Поскольку СД работает только при прямом токе, то и анализ характеристики целесообразно проводить только для прямого напряжения.

3) Дифференциальное сопротивление  $r_A = \frac{dU}{dI}$  или  $R_s = \Delta U / \Delta I$  на линейном участке ВАХ (Рис.8).

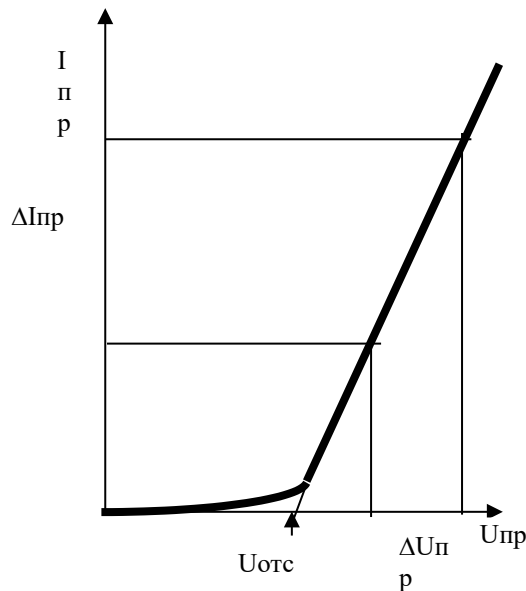


Рис.8. К определению  $R_s$

Поскольку  $R_s$ , как правило, имеет сравнительно малые значения (единицы Ом и менее), то произведением  $IR_s$  в показателе экспоненты уравнения (5) допускается пренебречь.

Кроме того, поскольку  $U$  много больше  $e/nkT$ , то экспонента много больше единицы, которой тоже можно пренебречь. Тогда можно записать

$$I = I_0 \exp eU/nkT \quad (6)$$

После логарифмирования

$$\ln I = \ln I_0 + eU/nkT \quad (7)$$

имеем прямолинейную зависимость  $\ln I$  от  $U$  с углом наклона, тангенс которого равен  $e/nkT$  (Рис.9). Отсюда  $n = (e/kT) \cdot (\Delta U / \Delta \ln I)$ .

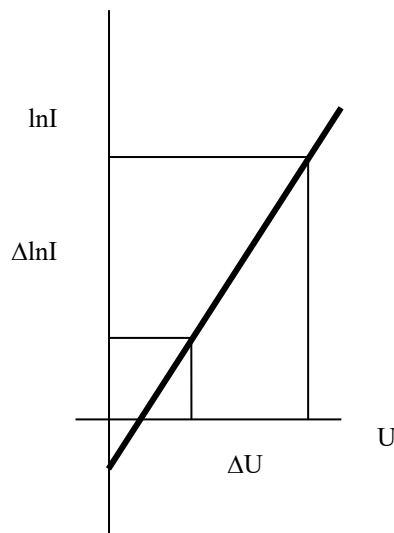


Рис.9. К определению коэффициента неидеальности

### **Фотометрические величины**

Специфическими параметрами светоизлучающих диодов как источников оптического излучения, являются световые или фотометрические величины, количественно характеризующие степень воздействия света на человеческий глаз.

*Сила света* – это фотометрическая величина, характеризующая интенсивность излучения источника света по ее восприятию человеческим глазом. Чувствительность глаза зависит от длины волны и максимальна при  $\lambda = 555$  нм. За единицу силы света в фотометрии принята кандела (кд).

*Световой поток* – характеризует мощность излучения источника света по ее восприятию человеческим глазом. Единицей измерения светового потока является люмен (лм). По определению световой поток от монохроматического источника с мощностью излучения  $(1/683)$  Вт на длине волны 555 нм равен 1 лм.

*Освещенность* – световой поток, приходящийся на единицу площади освещаемой поверхности. Единицей освещенности в системе СИ является люкс (люкс = лм/м<sup>2</sup>). Эта единица используется для характеристики условий освещения.

*Яркость* поверхности источника определяется как отношение силы излучаемого им света в некотором направлении к площади поверхности, проецируемой в этом направлении.

В большинстве случаев яркость определяется в направлении, перпендикулярном к поверхности кристалла. В этом случае яркость равна силе света, излучаемого вдоль нормали к поверхности кристалла, деленной на площадь этого кристалла (при наличии линзы, формирующей КСС, следует делить на площадь изображения).

Важнейшей характеристикой светодиода является внешний квантовый выход  $\eta_{\text{ext}}$ , который характеризует эффективность преобразования электрической энергии в световую. По определению энергетического выхода

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\Phi_e}{P}; \quad (8)$$

здесь  $\Phi_e$  - мощность оптического излучения, Вт;  $P = I \cdot U$  — электрическая мощность, потребляемая светодиодом, Вт;  $I$  - ток, проходящий через светодиод, А;  $U$  - напряжение на светодиоде, В.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ И СИЛЫ СВЕТА

Функциональная схема установки для измерения ВАХ, мощности (потока) излучения и люменамперных характеристик приведена на Рис.10. Здесь: 1– Источник питания GWIN-STEK PSS-3203, 2 – испытываемый СД, 3-фотоизмерительная головка, 4 –люксметр ТКА-Люкс.

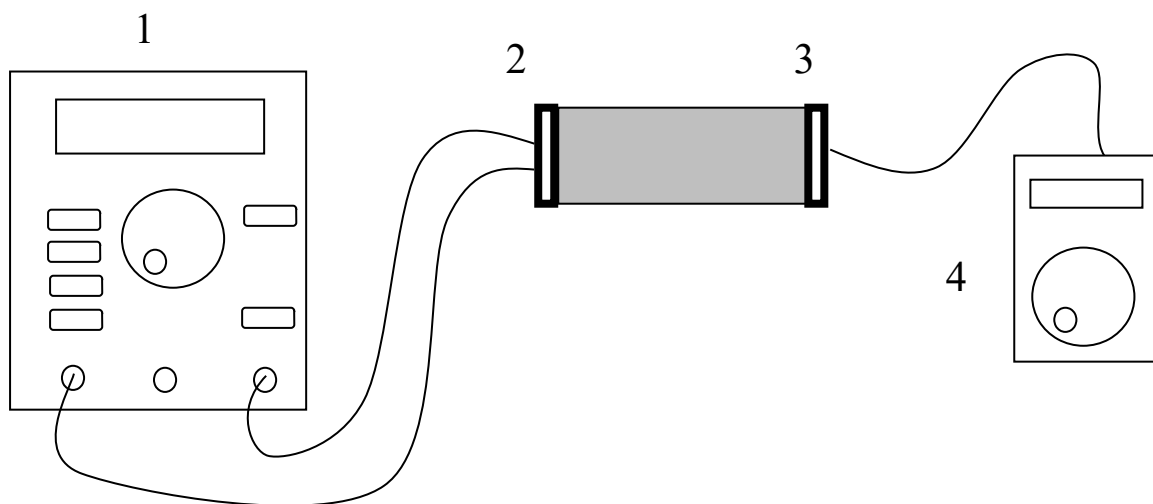


Рис.10. Блок - схема установки для измерения статических параметров светодиодов.

Установка включает в себя источник питания постоянного тока PSS-3203 с возможностью установки выходных параметров таких как напряжение и сила тока. На панели источника расположены кнопки управления (**F/C- грубо/ точно**) позволяющие варьировать целые и десятичные значения тока и напряжения. **Кнопка Vset/Iset** позволяющая переключаться

между параметрами напряжения и силы тока. Кнопка **OUTPUT** подает на клеммы установленные параметры значений силы тока и напряжения.

Излучающий СИДы представляют собой полупроводниковые гетероструктуры излучающие в синей ( $\lambda_{\text{макс}}=475$  нм), зеленой (изумрудной) ( $\lambda_{\text{макс}}=530$  нм) и красной ( $\lambda_{\text{макс}}=630$  нм) областях спектра с мощностью 1 Вт. Предельное значение силы тока 350 мА.

Измерение значений освещенности производится корригируемым люксметром. Важно в процессе измерения менять диапазон измерения освещенности, для исключения зашкала значений.

*Сила излучения* – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении

$$I_e = \Phi_e / \Omega, \quad (9)$$

где  $\Phi_e$  – поток (лм) или мощность излучения  $P_e$  (мВт);

$\Omega$  - телесный угол, ср.

Телесный угол с вершиной в центре сферы определяется отношением площади участка поверхности (освещённой площади измерительного фотоприёмника), на которую опирается этот угол, к квадрату радиуса сферы (расстоянию от излучателя до фотоприёмника). При измерении силы излучения необходимо учитывать, что значение телесного угла  $\Omega$ , в пределах которого производят измерения, должно быть не более 0,1 ср [7].

При использовании люксметра определить сила света определяется по формуле:

$$I_o = E_o / l^2 \quad (11)$$

где  $E_o$  – показание люксметра (освещённость окна люксметра либо площади диафрагмы),  $l$  – расстояние между светодиодом и плоскостью входного окна фотоголовки люксметра.

Для данного типа светодиодов, с индикатрисой распределения силы света в пространстве близкой с косинусному закону  $I_0 = \cos \alpha$  ( $\alpha$  – угол между осевым и выбранным направлением), соотношение между потоком и осевой силой света можно определить по формуле:

$$\Phi_v = I_0 / \pi. \quad (12)$$

## УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ РАБОТЫ

- 1) Собрать схему измерения характеристик светодиода согласно Рис. 10.
- 2) установить фотоизмерительную головку люксметра (3) в гнездо тубуса. Выставить режим  $\times 1$ .
- 3) выбрать красный СИД и подключить к разъему источника питания (1) соблюдая полярность подключения;
- 4) подать сетевое напряжение на блок питания нажав клавишу POWER.
- 5) Установить предельное значение силы тока через светодиод- 0,2 А. Для этого необходимо нажатием кнопки **Vset/Iset** перевести мигающий курсор на индикатор тока ИП. Нажатием кнопки F/C выбрать режим грубо или точно и выставить значения тока рукоятки (5).
- 6) Нажатием кнопки **Vset/Iset** перевести мигающий курсор на индикатор напряжения ИП. Выставить значение начального напряжения на светодиоде согласно таблице, действуя аналогично п.5.:

СИД	Начальное напряжение (В)	Предельное напряжение (В)
красный	1,73	2,22
зеленый	2,22	3
синий	2,5	2,96

- 7) Нажать клавишу OUTPUT. Убедиться в наличие свечения СИД. С помощью ручки регулятора на источнике питания можно плавно изменить значение напряжения и визуально определить изменение свечения светодиода.
- 8) Установить излучатель в цилиндрический тубус (2).
- 9) Приступить к измерениям световых и электрических параметров СИД в зависимости от изменения питающего напряжения следующим образом: 1. Установить напряжение, 2. Определить значения тока, 3) определить значение показания люксметра, 4) установить следующее значение напряжения и повторить п. 1-3.
- 10) Шаг изменения напряжений следует выбирать с таким расчетом, чтобы весь диапазон измерений (см. пункт...) включал 15 точек.
- 11) Последовательность задания напряжений источника питания может быть любой, то есть в ходе эксперимента могут быть получены дополнительные (промежуточные) точки, позволяющие уточнить ход зависимости  
ВАЖНО! В процессе измерений необходимо следить за показаниями на люксметре и при необходимости изменять диапазон измерений.
- 12) После проведения измерений необходимо отжать клавишу OUTPUT.
- 13) Поменять СИД на другой. См. пункт. 2-4
- 14) Нажав на кнопку OUTPUT повторить пункты 5-9.

15) После окончания работы необходимо выключить установку в порядке, обратном включению.

### ЗАДАНИЕ

1. Исследовать вольтамперные и люменамперные характеристики «зеленого», «синего» «красного» светодиодов при 15 значениях тока. При этом обращать внимание на тщательность измерения напряжения, которое изменяется незначительно при изменении тока в широком интервале значений.
2. Используя программу «Microsoft Excel» либо пакет «Origin» построить графики ВАХ и люмен-амперных характеристик в относительных единицах, определить  $U_{отс}$  и  $R_s$ .
3. Построить зависимость силы излучения от мощности СИД.
4. Построить ВАХ в координатах  $\ln I$  и  $V$ . Определить  $n$  по наклону прямой.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

$k=8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/К;  $S=1$  мм<sup>2</sup>;  $h\nu_{зел}=2,38$  эВ;  $h\nu_{красн}=1,96$  эВ.

Для перевода световых единиц (лм) в энергетические (Вт) необходимо световой поток "зеленого" ( $\lambda_{эфф}=530$  нм) светодиода разделить на 485 лм/Вт, а "красного" ( $\lambda_{эфф}=630$  нм) – на 180 лм/Вт; геометрический фактор установки  $\delta=10^{-2}$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия излучающих диодов
2. Спектральные характеристики ПИД и факторы влияющие на них.
3. Параметры излучающих диодов и факторы, влияющие на них.
4. Конструкция ИД.
5. Что такое внешний квантовый выход и КПД СД?
6. Методы повышения квантового выхода?
7. материалы используемы для изготовления ИД их влияние на спектральную характеристику излучения.
8. Определить телесный угол для измерения силы света.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шуберт Ф.Е. Светодиоды: Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.
3. Юнович А. Э. Свет из гетеропереходов. // Природа. – 2001. – № 6. – С. 38–46.
4. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника: Пер. с англ. под ред. С.А. Медведева. – М.: Мир, 1976. – 431 с.
5. 6.3 и С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1: Пер. с англ.– М.: Мир, 1984. – 456 с.

6. Национальный стандарт ГОСТ Р 55702–2013. Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров – Москва: Стандартинформ, 2014.
7. Антонов В.В., Круглов О.В., Кузьмин В.Н. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов // Полупроводниковая Светотехника, 2010. – № 3. – С. 26-31.