

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра физической электроники (ФЭ)

ОСНОВЫ ФОТОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и
микросистемная техника»
(уровень бакалавриата)

Томск, 2022

УДК 53.043

ББК 32.854.1

Рецензент:

Троян П.Е., заведующий кафедрой физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,
д-р техн. наук, профессор

Смирнов Серафим Всеволодович

Основы фотоники и оптоэлектроники: Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направлений 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (уровень бакалавриата) / С.В. Смирнов. – Томск, 2022. – 20 с.

В методических указаниях изложены рекомендации по выполнению лабораторных работ.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

УДК 53.043

ББК 32.854.1

©Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники
© Смирнов С.В., 2022

Лабораторная работа 1 «Исследование внешней квантовой эффективности полупроводниковых светодиодов»

Цель работы: исследование характеристик промышленных светодиодов видимого и инфракрасного диапазона длин волн.

Принцип действия таких светодиодов основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с р-п-переходом, и эффективном преобразовании электрической энергии в световую. Когерентное монохроматическое или спонтанное высвечивание (люминесценцию) в полупроводнике можно получить рядом методов возбуждения (накачки): оптическим возбуждением, воздействием на полупроводник пучком быстрых электронов с высокой энергией, возбуждением полупроводниковых материалов импульсами электрического поля (ударной ионизацией).

Наиболее распространен метод возбуждения при инжекции носителей через р-п-переход. Рассмотрим инжекционное возбуждение на примере р-і-п-перехода (рисунок 1).

В идеальном полупроводнике при температуре абсолютного нуля валентная зона полностью занята электронами, а зона проводимости полностью свободна, и полупроводник является изолятором. При температуре выше абсолютного нуля вследствие теплового возбуждения часть валентных электронов переходит в зону проводимости; в валентной зоне при этом возникают свободные места – дырки.

Термодинамическое равновесие характеризуется наличием равновесных концентраций основных носителей – дырок и электронов – соответственно в областях р и п, которые способны рекомбинировать с носителями противоположного знака в случае инжекции последних извне.

Если приложить к переходу типа р-і-п напряжение в прямом направлении, то в зоне і появляются носители обоих знаков. При рекомбинации этих носителей энергия от внешнего источника напряжения передается решетке полупроводника в виде тепловой или выделяется в виде световой энергии. Потенциальный барьер между областями р и п снижается, и электроны из области п диффундируют в область объемного заряда (зона I на рисунке 1, а) и в область р, создавая там избыточную (неравновесную) концентрацию.

Аналогично возникает избыточная концентрация дырок в области п и слое объемного заряда. На рисунке 1, б на примере зонно-примесной структуры полупроводника показаны основные явления при рекомбинации. Если электрон или дырка переходят из одной зоны в другую, рекомбинация называется межзонной, или собственной (I). Во втором случае (II) переход осуществляется через примесный уровень. Такая рекомбинация называется примесной. Возможен и третий случай рекомбинации (III). В результате межзонной или примесной рекомбинации при исчезновении пары (электрона и дырки) выделяется энергия, определяемая в первом случае шириной запрещенной зоны ΔE_G , а во втором – шириной ΔA_i от зоны проводимости до примесного уровня. Энергия может выделяться в виде светового кванта ($f = \Delta E / h$) или передаваться в виде тепла (фонона) кристаллической решетке. В третьем случае энергия рекомбинирующей пары передается третьему свободному носителю тока, который в дальнейшем отдает полученную энергию в виде фонона. Переходы с выделением световых квантов называют излучательными, а в случае выделения фононов – безызлучательными.

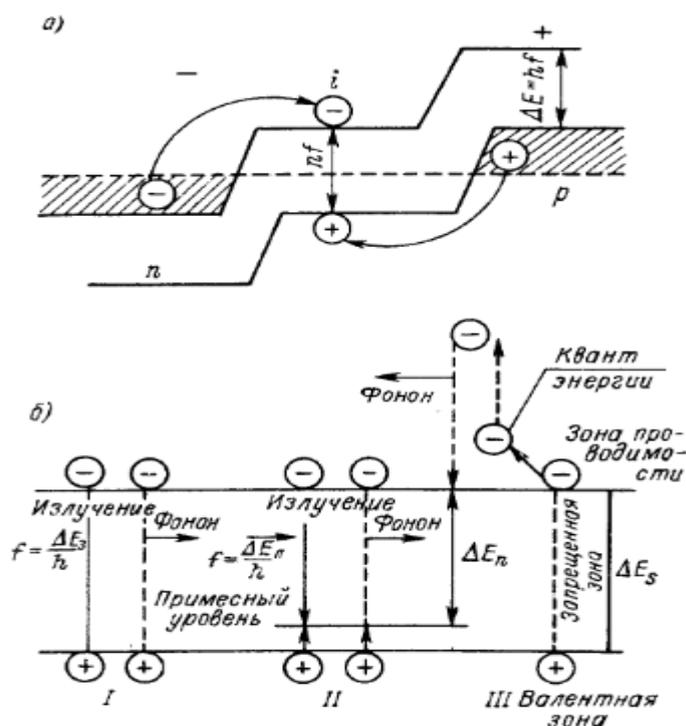


Рисунок 1– Расположение энергетических зон и уровня Ферми светодиода с р-п-переходом и механизм рекомбинации в модели зон полупроводника: а – расположение энергетических зон и уровня Ферми светодиода с р-і-п-переходом; б – механизм рекомбинации в модели зон полупроводника; I – переход типа зонно–зона; II – зона – примесный уровень; III – переход с возбуждением электрона в зоне проводимости: сплошная линия – излучающие переходы; пунктирная линия – неизлучающие переходы

Наилучшими свойствами для излучательной рекомбинации обладает арсенид галлия GaAs. В зависимости от числа инжектированных носителей по отношению к состоянию термодинамического равновесия в зоне проводимости увеличивается, а в валентной зоне уменьшается уровень населенности допустимых состояний. При малом уровне инжекции это отклонение может привести к спонтанным переходам, т.е. к люминесценции, а при большой инжекции – после достижения инверсии населенности – к лазерному эффекту (интенсивному, когерентному, монохроматическому высвечиванию с малым углом расходимости луча).

Спектральные характеристики люминесцентных светодиодов

Светодиоды излучают в спектральном интервале до нескольких десятков нанометров. Длина волны излучения определяется энергетической шириной зон полупроводника, чаще всего шириной запрещенной зоны ΔE_c : $\lambda = (hc) / \Delta E_c$. Известные в настоящее время полупроводниковые материалы позволяют создавать источники света в видимой и ИК–областях спектра.

Спектральные характеристики светодиодов зависят от рабочего диапазона температур.

Спектральные характеристики светодиода зависят также от плотности тока в р-п-переходе. При малых плотностях свободных носителей в зонах излучательная (прямая) рекомбинация маловероятна. Повышение же концентрации носителей увеличивает интенсивность рекомбинации.

Эффективность люминесценции

При заданной энергии возбуждения наряду с излучательной рекомбинацией протекают конкурирующие безизлучательные процессы (рисунок 3.4.). Квантовая эффективность люминесценции определяется как отношение числа возбужденных носителей, дающих вклад в излучение, к полному числу носителей, участвующих в рекомбинации, и может быть выражена через времена жизни следующим образом:

$$\eta = R_r/R = \tau / (\tau_{nr} + \tau_r),$$

где τ_r и τ_m — времена жизни излучательной и безизлучательной рекомбинации соответственно, а R_r и R - скорости излучательной и полной рекомбинации.

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

$$R = (n - n_0) / \tau$$

Аналогично для слоев n-типа

$$R = (p - p_0) / \tau$$

где n_0 и p_0 — концентрации электронов и дырок в состоянии теплового равновесия, а n и p — электронная и дырочная концентрация при оптическом возбуждении. Время жизни τ неравновесных носителей дается выражением

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

Из уравнения видно, что для обеспечения высокой квантовой эффективности время жизни τ_r должно быть мало. С ростом температуры эффективность уменьшается и для светодиодов на арсениде галлия имеет значения около 40, 32 и 7% при температурах 20, 77 и 300К соответственно.

Основной характеристикой излучающих светодиодов является внешний квантовый выход, рассматриваемый как произведение внутреннего квантового выхода и коэффициента вывода излучения (или оптической эффективности) прибора:

$$\eta_q = \eta_{\text{int}}(T, I) \eta_0,$$

где $\eta_q, \eta_{\text{int}}$ — внешний и внутренний квантовые выходы; T — температура, К; I — интегральный ток в переходе; η_0 — оптическая эффективность конструкции.

Внешний квантовый выход светодиода можно определить следующим образом:

$$\eta_q = (P_e / hf) / (I / e),$$

где в числителе — число излученных за 1 с фотонов, а в знаменателе — число носителей, введенных в переход за 1 с; P_e — интегральная мощность внешнего излучения светодиода; h — постоянная Планка; f — частота излучения; e — заряд электрона. Коэффициент полезного действия светодиода

$$\eta_e = P_e / (IU),$$

где U — приложенное к диоду напряжение.

Энергия кванта излучения равна $hf = eU_r \approx \Delta E_c$, где U_r — разность потенциалов, соответствующая ширине запрещенной зоны. Отсюда можно получить связь между КПД (η_e) и внешним квантовым выходом

$$\eta_e = \eta_q (U_r / U).$$

Для оптико-электронных приборов в первую очередь имеет значение внешний квантовый выход. Он, как правило, меньше внутреннего квантового выхода, что обусловлено поглощением генерируемого в р-п-переходе (десятые доли микрометра) излучения в толще полупроводника и контактах, а также френелевскими потерями на отражение на границе полупроводник – среда, в которую выходит излучение.

Наиболее высокий внешний квантовый выход при комнатной температуре имеют отечественные светодиоды из GaAs, изготовленные методом жидкостной эпитаксии. При токе 100 мА мощность их излучения достигает 21 мВт, что соответствует внешнему квантовому выходу 16%. Светодиоды из фосфида галлия в настоящее время изготавливают с красным и зеленым цветами свечения (большой КПД имеют источники красного цвета, однако он у них во много раз меньше, чем у светодиодов из арсенида галлия). Наиболее эффективные светодиоды из фосфида галлия для красной области получают также жидкостной эпитаксией. Такие светодиоды имеют квантовый выход до 1,3%. Интенсивность излучения у них пропорциональна силе тока в диапазоне от 1 до 10 мА. мощность достигает 0,1–0,2 мВт.

Исследование внешнего квантового выхода излучения

Выполняется на светодиодах с известным спектром излучения (то есть после выполнения пункта 2 работы). Для исследований используется специальное устройство с интегрирующей сферой и фотодиодом ФД-24К. (рис.2) Для проведения исследований необходимо вставить светодиод в приемное устройство и подключить его к источнику питания постоянного тока. В данной работе для измерения абсолютной мощности излучающих диодов используется градуированный кремниевый фотодиод с большой рабочей поверхностью. Если фотодиод, имеющий дифференциальное сопротивление r_f , замкнуть на внешнее сопротивление $R \ll r_f$, то ток короткого замыкания $I_{кз}$ в цепи определяется только внутренними свойствами диода. Отношение числа электронов $I_{кз}/e$, проходящих в единицу времени в короткозамкнутой цепи, к числу падающих на диод фотонов называется квантовым выходом фотодиода, $F(h\nu)$.

Чувствительность фотодиода можно также характеризовать отношением $I_{кз}$ к мощности падающего излучения (размерность А/Вт или мкА/мкВт). Спектральная зависимость чувствительности кремниевого фотодиода показана на рисунке 2. Максимальная чувствительность фотодиода $S_m=0,54$ А/Вт.

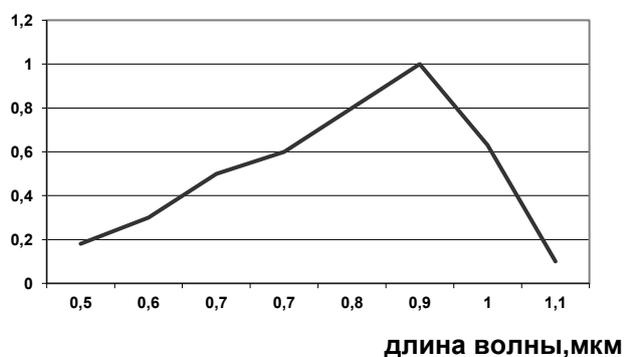


Рисунок 2 – Спектральная чувствительность фотодиода ФД-24К

Внешний квантовый выход η определяется как отношение интегрального по всему спектру числа излученных квантов Φ , выходящих во внешнюю среду по всем углам, к числу электронов, пересекающих pn – переход в единицу времени.

$$\eta = \frac{\hat{O}q}{I} = \frac{\eta_{\text{ii}\hat{o}} \hat{O}q}{I} = \eta_{\text{ii}\hat{o}} \eta.$$

Внешний квантовый выход представляет важнейшую характеристику люминесцентного диода, определяющего долю преобразования энергии возбужденных электронно-дырочных пар в энергию световых квантов, выходящих из диода.

Мощность излучения измеряют с помощью фотодиода ФД-24К, регистрируя ток короткого замыкания с помощью микроамперметра. Электрическая мощность на фотодиоде равна $P = I_{\text{кз}} U_{\text{хх}}$. Таким образом, мощность излучения светодиода определится как, $P_{\text{изл}} = I_{\text{кз}} U_{\text{хх}} K^{-1}$, где K – коэффициент сбора, для ФД-24К $K=0,5$.



Рисунок 3 – Внешний вид лабораторного макета.

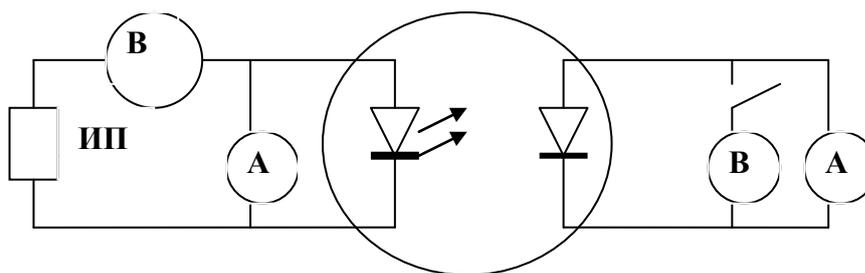


Рисунок 4 – Электрическая схема

Порядок выполнения работы.

Собрать электрическую схему питания светодиода и фотодиода от источника питания (см. рисунок).

Вставить светодиод в приемное устройство.

Изменяя ток от 0 до 30 мА светодиода снять вольтамперную характеристику диода.

Одновременно снимать ватт-амперную характеристику светодиода. Построить полученные зависимости и дать им объяснение.

Лабораторная работа №2. Практические фоторадиометрические измерения

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

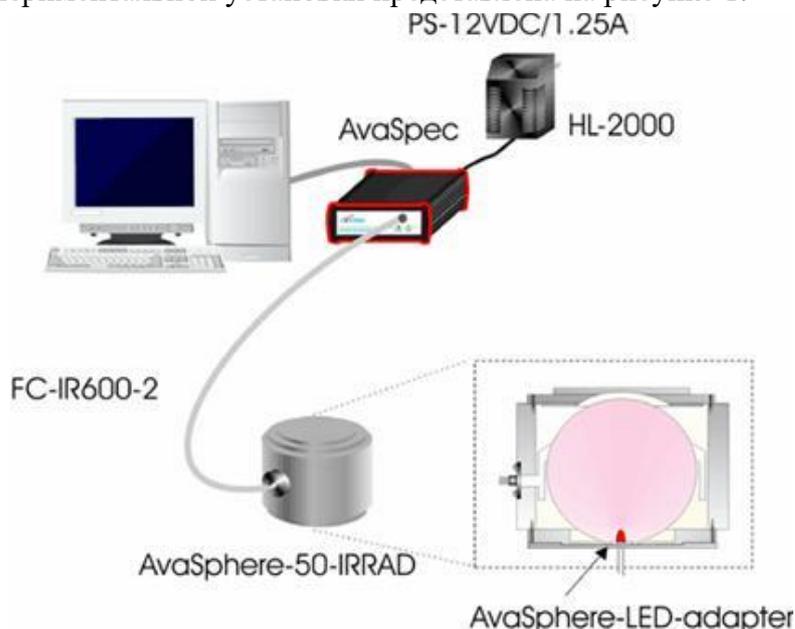


Рисунок 1 – Примерный набор оборудования и приспособлений для исследования фотометрических параметров излучающих светодиодов

Приборы и принадлежности:

1. Персональный компьютер с установленным программным обеспечением AvaSoft – 7.2;
2. Оптоволоконный спектрометр AvaSpec 2048- FT-2-SPU;
3. Стабилизированный источник питания PS – 12VDC/1.25A;
4. Соединительный кабель питания HL – 2000;
5. Приспособление для установки излучающего образца AvaSphere – LED – adapter;
6. Оптоволоконный кабель FS – IR600 - 2;
7. Интегрирующая сфера AvaSphere – 50 – IRRAD;
8. Излучающие диоды, лампы накаливания;

Порядок сборки и запуска измерительной системы

Проверить и удостовериться, что все элементы установки, приборы и приспособления находятся в наличии и пригодны для выполнения работы.

Подготовить исследуемые образцы для измерений, с помощью соединительных проводов подсоединить к источнику электропитания, вставить в держатель и закрепить в интегрирующей сфере. Подать на светодиод ток в прямом направлении 30 мА при напряжении 2-4 В, и убедиться, что светодиод излучает свет.

Собрать электрическую и оптическую схему для проведения экспериментальных измерений согласно рис. 1.

Включить тумблер электрического питания на панели блока розеток, после включения должна загореться сигнальная лампочка.

Включить тумблеры питания на блоке источников питания, блоке оптической обработки сигналов, нажать кнопку включения компьютера и подождать загрузки

программного обеспечения. После загрузки программного обеспечения на экране появится изображение с пиктограммой AvaSoft-7.2.

Войти в программу AvaSoft, щёлкнув два раза по пиктограмме AvaSoft-7.2. В появившемся окне информации (рис. 2) нажать кнопку ОК.



Рисунок 2 – Окно информации о готовности работы спектрометра

Появляется главное окно основного меню программы (рис. 3).

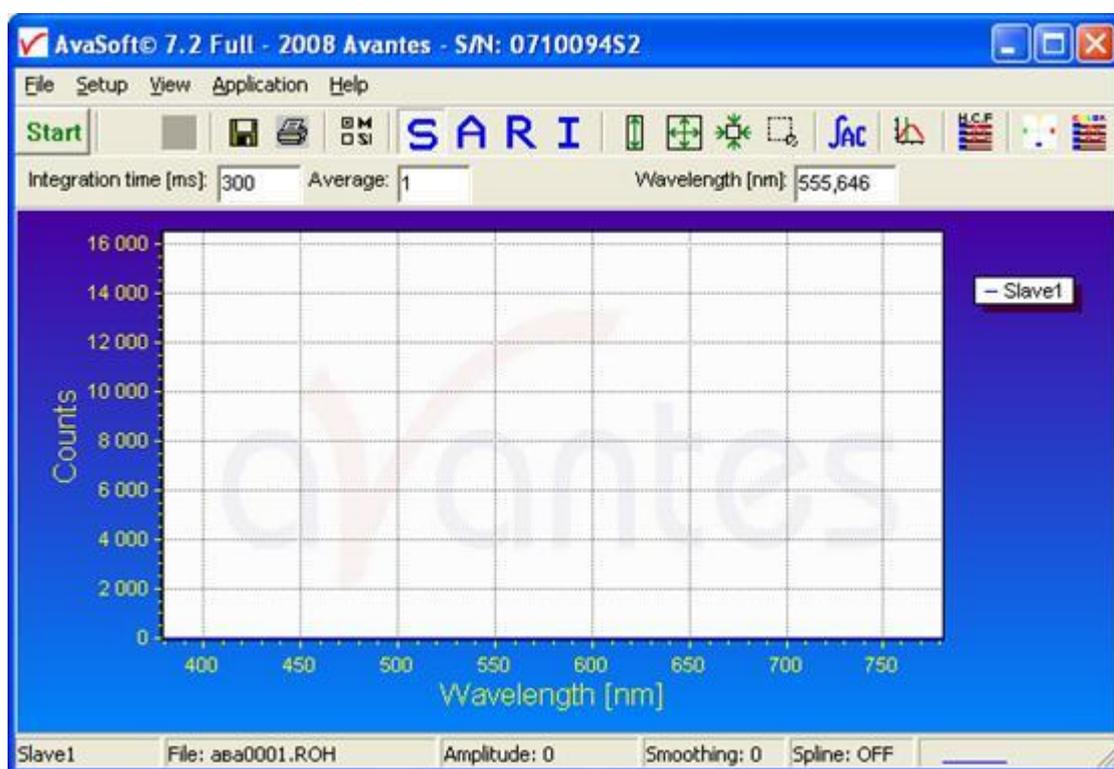


Рисунок 3 – Главное окно основного меню программы

Задание №1. Экспериментальное измерение спектра излучения

После запуска программы AvaSoft щелкните кнопку Start в главном окне.

Настройте параметры сглаживания в меню Setup для того, чтобы оптимизировать сглаживание для используемого диаметра световода или спектральной щели.

Спектр излучения можно снимать или с помощью оптоволоконного зонда или с использованием интегрирующей сферы. Если спектр снимается с помощью зонда, то его нужно жёстко закрепить на источнике света. Обычно на экране сразу можно увидеть какой-то спектр, но, возможно, света будет или слишком много, или слишком мало при установленных настройках. То, что света слишком много означает, что в соответствующей спектральной области сигнал перегрузки выглядит как прямая линия на произвольной высоте, даже вблизи нуля. Эту проблему обычно можно решить выбором более короткого времени интегрирования. Время интегрирования может быть изменено в главном окне в

белом боксе, расположенном ниже кнопки **start/stop**. Если AvaSoft накапливает данные, то кнопка **start/stop** выглядит как красная **'stop'**, а бокс времени интегрирования серый. Это означает, что оно не может быть изменено. После щелчка кнопки **'stop'** поступление данных останавливается, и время интегрирования может быть изменено. Результат изменения времени интегрирования может быть виден после щелчка зеленой кнопки **'start'**. Попробуйте настроить время интегрирования так, чтобы максимальная амплитуда во всей спектральной области была бы примерно 14000. Когда при минимальном времени интегрирования сигнал все равно слишком велик, используйте световод меньшего диаметра. Если в спектрометр поступает недостаточно света время интегрирования должно быть увеличено.

После получения спектра, развёртка которого расположена на всё поле координатной сетки экрана, выключите исследуемый источник света. Теперь сохраните темновые (Dark) данные. Это делается при помощи File-Save Dark из меню или щелчком мыши на черном квадрате в левом верхнем углу экрана.

После сохранения или загрузки опорных темновых данных режим измерения излучения может быть выбран щелчком кнопки **start/stop**. После появления на экране спектра излучения нажать на кнопку **stop**.

Измерения Пика (Peak Measurements)

На рис. 4 показано типичное спектральное распределение энергии зеленого светоизлучающего диода (СИД).

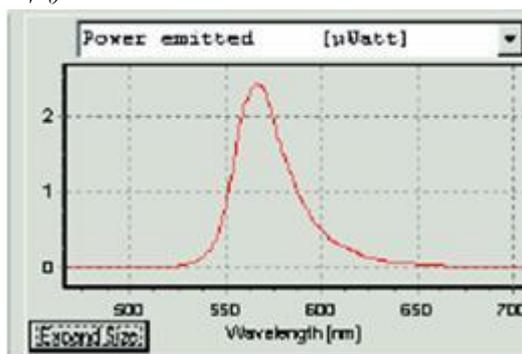


Рисунок 4 – Спектральное распределение излучения зелёного светодиода.

Из этого спектра может быть рассчитано и получено некоторое количество параметров пика:

Полуширина пика (The Full Width Half Maximum) - это ширина (в нанометрах), для которой интенсивность больше, чем половина максимальной интенсивности этого пика.

Центральная длина волны (Center Wavelength). – это длина волны середины между длинами волн слева и справа, для которых интенсивность равна половине максимальной.

Длина волны Пика (Peak Wavelength) – длина волны максимума спектрального распределения энергии.

Длина волны центриды (Centroid Wavelength) – длина волны, для которой полная спектральная энергия (интеграл) справа и слева одинаковы.

Для анализа полученного на экране спектра нажать на кнопку  в окне главного меню программы, на экране появляется визирная линия с помощью, которой необходимо найти максимальную амплитуду в спектре излучения и определить длину волны, которая

отображается на экране, рис. 4. Измерения повторить 10 раз. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерения длины волны при максимальной амплитуде

№ изм.	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	λ , нм	$\Delta\lambda_1$, нм	λ , нм	$\Delta\lambda_2$, нм	λ , нм	$\Delta\lambda_3$, нм
1						
2						
3						
...						
10						
$\lambda_{\text{ср}}$, нм						
$\Delta\lambda$, нм						

Обработка результатов.

Рассчитать длину волны $\lambda_{\text{макс}}$, соответствующую максимальной интенсивности излучения для определённого исследуемого образца. Для этого для каждого исследуемого образца рассчитать среднюю величину длины волны с максимальной интенсивностью:

$$\lambda_{\text{ср.макс}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} = (\lambda_{1\text{макс}} + \lambda_{2\text{макс}} + \dots + \lambda_{10\text{макс}}) / 10,$$

где $\Delta\lambda_i$ – результат измерения с номером i , который в нашем случае изменяется от 1 до n ; n – число измерений данной величины (в нашем случае $n = 10$).

Затем найти абсолютную погрешность каждого измерения по формуле:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{i\text{макс}} - \lambda_{\text{ср.макс}}.$$

Нахождение доверительного интервала производится по формуле:

$$\Delta\lambda = \sum_{i=1}^n |\Delta\lambda_i| / n$$

Результат записать в виде: – длина волны, соответствующая максимальной энергии излучения равна среднему значению \pm доверительный интервал.

Например, для образца № 1: $\lambda_{1\text{макс}} = \lambda_{1\text{ср.макс}} \pm \Delta\lambda_1$

Задание № 2. Определение координат цветности излучателя

После снятия спектральных характеристик можно определить координаты цветности, а также цветовую температуру исследуемого источника освещения, которые могут быть отражены в режиме реального времени, как это показано на рис. 5.

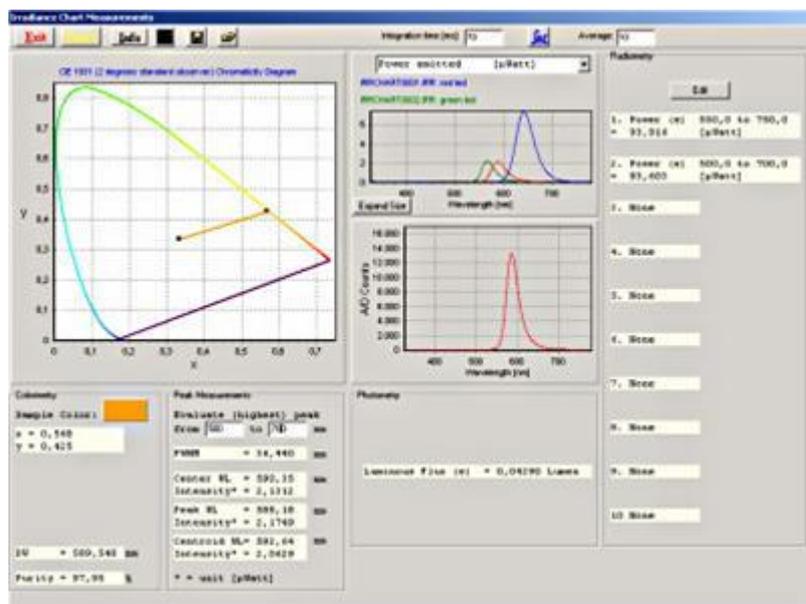


Рисунок 5 – Вид экрана монитора при цветовых измерениях излучателей

Из спектра излучения (в $\mu\text{Watt}/\text{cm}^2$) может быть вычислено большое количество световых параметров: колориметрических, фотометрических и радиометрических.

Ниже дается краткая информация о колориметрических, радиометрических и фотометрических параметрах и описана процедура определения доступных для измерения параметров.

Колориметрия (Colorimetry)

Цвет света может быть выражен хроматическими координатами x , y и z . Эти хроматические координаты получаются выбором отношений величин (X , Y и Z) к их сумме:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}.$$

Величины X , Y и Z рассчитываются как:

$$X = k \times \sum I_{\lambda} x_{\lambda}; \quad Y = \sum I_{\lambda} y_{\lambda}; \quad Z = \sum I_{\lambda} z_{\lambda},$$

где I_{λ} = интенсивность излучения на длине волны λ , x_{λ} , y_{λ} , z_{λ} – величины принятые МКО в 1931 и 1964 годах для стандартного наблюдателя под углом зрения 2 или 10 градусов соответственно на длине волны λ .

$$k = \text{const} = (1 / \sum y_{\lambda}) = 0,00934.$$

X , Y и Z и спектральное излучение рассчитываются для области длин волн от 380 нм до 780 нм, при величине интервала в 1 нм.

Международным комитетом по освещению (МКО) в 1960 г. принято, что цветовые координаты u и v рассчитываются, как:

$$u = 4x / (-2x + 12y + 3) \quad \text{и} \quad v = 6y / (-2x + 12y + 3)$$

Для расчета цветовой температуры используется уравнение, которое является эмпирическим и имитирует излучатель абсолютно черного тела:

$$p = ((x - 0.332) / (y - 0.1858))$$

Цветовая Температура (Color Temp)

$$T_{\text{цв}} = 5520.33 - (6823.3 * p) + (3525 * p^2) - (449 * p^3).$$

При измерениях светоизлучающих диодов (СИД) и других излучающих объектов для описания цвета часто используется Основная Длина волны (Dominant Wavelength) и Спектральная Чистота (Purity) (также известные, как координаты (Helm Holz)).

Основная длина волны может быть получена для измеренной точки образца S с хроматическими координатами цветности (S(x), S(y)). Для этого нужно провести прямую линию из середины хроматической диаграммы (ахроматическая точка E при x=y=0.333, точка белого цвета) и измеренную точку S(x,y) к краю хроматической диаграммы (линии локуса) на треугольнике цветности рис. 6.

Точка пересечения прямой проходящей через точки E и S со спектральной линией локуса соответствуют основной (доминантной) длине волны. Метод, описанный выше, пригоден для всех цветов, где основная длина волны, лежит в области от 380 до 699 нанометров. Если координаты x, y находятся в области треугольника, ограниченного точками E, A и B, то основная длина волны не может быть рассчитана, потому что точка пересечения прямой, проходящей через E и S между A и B не соответствует длине волны. В этом случае пользуются дополнительным способом и находят сопряжённую длину волны (Complementary) Dominant Wavelength (CDW). Линия из E в S(x,y) направляется в другую, (обратную) сторону, чтобы определить сопряжённую длину волны(CDW).

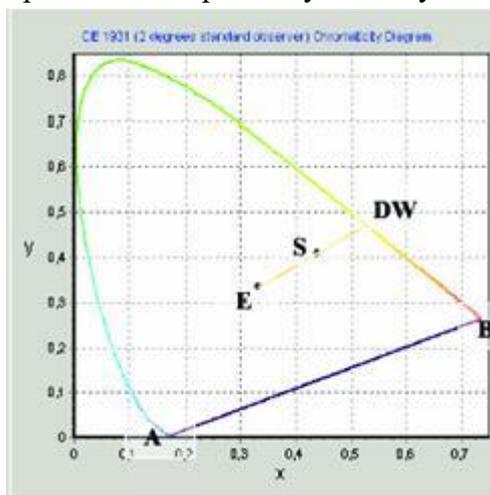


Рисунок 6 – К нахождению основной длины волны излучения

Чистота цвета (Purity) – есть отношение расстояния от ахроматической точки (E) до точки образца (S), деленное на расстояние от точки S до точки пересечения прямой с линией локуса DW.

$$\text{Чистота цвета (Purity)} = (E-S) / (E-DW).$$

Лабораторная работа №3. Изучение принципа работы кремниевого солнечного элемента и основные его параметры.

Цель работы: изучение принципа работы и определение основных параметров кремниевого солнечного элемента.

Полупроводниковые материалы нашли широкое применение для получения электрической мощности от различных источников излучения, в том числе и солнца.

Процесс преобразования оптического излучения в электрическую энергию состоит из нескольких этапов.

1. Генерация электронно-дырочных пар фотонами при их проникновении в объём кристалла. Так как в видимой области спектра для электронно-фотонного взаимодействия в кремнии квантовый выход равен единице, то каждый фотон, поглощенный в кристалле, вызывает образование электронно-дырочной пары.

2. Диффузия электронно-дырочных пар, происходящих благодаря градиенту их концентрации, и собиание неосновных носителей р-n переходом или рекомбинация электронно-дырочных пар, не достигающих перехода.

Для возникновения фотоэлектродвижущих сил необходимо разделение зарядов в пространстве. Особенно эффективное разделение неравновесных носителей имеет место в неоднородных полупроводниках и, в частности, в электронно-дырочных переходах.

В области р-n – перехода существует объемный заряд и объемное поле \vec{E} , направленное от n-области к р-области (рис. 1). Электроны и дырки, генерируемые в n-области и р-области на расстояниях, не превышающих длин диффузии L_n и L_p будут разделены полем \vec{E} так, что неравновесные электроны будут переведены в n-область, а дырки в р-область, т.е. контактное поле способствует переходу через область объемного заряда неосновных носителей. N-область заряжается отрицательно, а р-область -положительно.

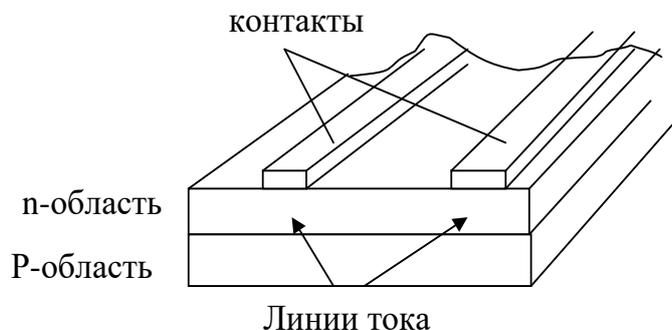


Рисунок 1 – Пояснения к работе солнечного элемента
Дифференциальное уравнение диффузии для стационарного случая

$$(p_n - p) / \tau + \alpha N \exp(-\alpha x) + D_p (d^2 p / dx^2) = 0.$$

Первый член в уравнении учитывает рекомбинацию избыточных носителей $(p_n - p)$ с временем жизни τ ; следующий член представляет собой количество генерируемых неосновных носителей, образованных N фотонами, падающими на единицу площади элемента за единицу времени, а α – коэффициент поглощения материала; последний член учитывает скорость диффузии.

Если такой полупроводник включить в замкнутую цепь, то в ней потечет ток, направленный от р-области к n-области, приводящий к уничтожению избыточной концентрации электронов и дырок. Из самого механизма возникновения полей следует, что

максимальная фото-эдс на р-п переходе не может превзойти величину контактной разности потенциалов.

Для солнечного элемента рабочая точка на вольтамперной характеристике должна быть выбрана так, чтобы элемент производил возможно большую мощность.

Часто вольтамперная характеристика элемента описывается выражением:

$$J = J_0[\exp(eV/\beta kT) - 1] - J_{кз},$$

где J_0 – темновой ток (для данного элемента $-1 \cdot 10^{-6}$ А),

V – разность потенциалов на электродах элемента (напряжение холостого хода);

$J_{кз}$ – ток короткого замыкания элемента.

Из вольтамперной характеристики следует, что мощность, выделяемая на элементе равна

$$|JV| = |VJ_0[\exp(eV/kT) - 1] - VJ_{кз}|,$$

Из этого уравнения следует, что максимальная мощность элемента равна:

$$W_{\max} \approx (kT/e)J_{кз}(r-1),$$

где r дается уравнением:

$$(r+1) \exp(r) = J_{кз}/J_0$$

Величина тока короткого замыкания $J_{кз}$ определяется числом неравновесных пар, разделенных полем р-п перехода. Отсюда:

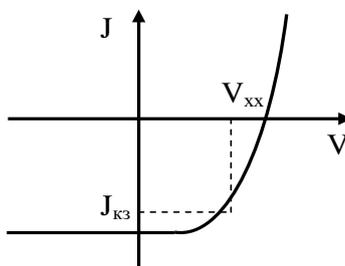
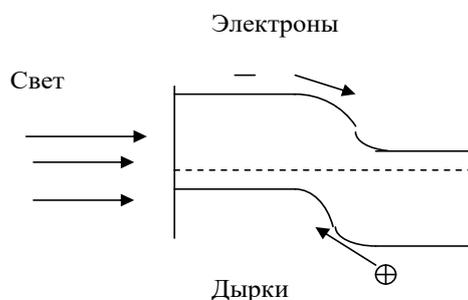
$$J_{кз} = q\beta kI\eta,$$

где β – квантовая эффективность преобразования (число электронно-дырочных пар на один поглощенный фотон);

k – коэффициент поглощения полупроводника (см^{-1});

I – интенсивность потока фотонов ($\text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$);

η – коэффициент сбора, определяющий долю носителей дошедших до р-п перехода.



Из уравнения следует, что спектральной характеристикой фотопреобразователя служит спектральная зависимость тока короткого замыкания.

Основным параметром солнечных элементов служит эффективность преобразования, или коэффициент полезного действия, т.е. отношение электрической мощности, выделяемой

на элементе к мощности падающего излучения. Это достигается высоким уровнем легирования слоев кремния с обеих сторон р-п перехода до 10^{18}см^{-3} .

Порядок выполнения работы

1. Установить на штативе осветитель и солнечный элемент. Установить на осветителе диафрагму «2,5 см». Включить осветитель в сеть и изменяя высоту его положения добиться того чтобы пятно света не выходило за пределы элемента. При открытой диафрагме плотность светового потока на элементе составит 0,75 Вт.

2. Изменяя величину магазина сопротивлений от 10 Ом до 10 кОм измерить величину тока элемента, а затем рассчитать и падение напряжения как произведение тока на электрическое сопротивление. По полученным данным построить ВАХ элемента.

3. Применяя метод Симпсона определите производимую элементом электрическую мощность.

4. Меняя величину отверстия диафрагмы и повторяя операции п.2. и 3 снять зависимость эффективности преобразования (кпд) от падающей мощности излучения осветителя (в относительных единицах). Используя светофильтры, их спектральные характеристики и спектр излучения лампы определите эффективность солнечного элемента для различных участков спектра излучения.

5. Рассчитайте по формулам (4,5) максимальную мощность солнечного элемента и сравните её с измеренной. Объясните полученный результат.

6. Снимите ВАХ при температуре $+50^{\circ}\text{C}$ и объясните полученный результат.

Контрольные вопросы

Что такое фото-ЭДС и причины её возникновения в полупроводниках.

Принцип работы элемента и механизм разделения электронно-дырочных пар.

Что такое генерация и рекомбинация неосновных носителей в полупроводниках.

Нарисуйте наиболее вероятную зависимость КПД солнечного элемента от длины волны излучения и объясните её основные особенности.

Каким образом КПД элемента связан с шириной запрещенной зоны полупроводника.

Таблица 1 – Коэффициентов поглощения светофильтров $k\lambda$

$\lambda, \text{нм}$	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
УФС	0,04	2,18	4	4					
КС		3	2,0	2,0	0,22	0,06	0,008	0,008	
ИКС				3	2,0	1,6	0,26	0,14	0,06
СЗС			0,006	0,02	0,04	0,08	0,49	1,5	2
ОС			1,5	0,12	0,04	0,004	0,004	0,004	

Лабораторная работа №4. Исследование чувствительности фоторезистора

Фоторезистор представляет собой пластинку или пленку фотоактивного полупроводникового материала, снабженные двумя невыпрямляющими контактами. При подаче внешнего напряжения в отсутствие освещения в цепи, в которую включен фоторезистор, течет ток, называемый темновым. Величина темнового тока определяется напряжением и сопротивлением образца (т. е. его равновесной проводимостью и размерами) в соответствии с законом Ома. При освещении фоторезистора ток в цепи изменяется, поскольку изменяется проводимость материала. Приращение тока в цепи, т. е. разность токов при наличии и в отсутствие освещения, называется световым током, или фототоком.

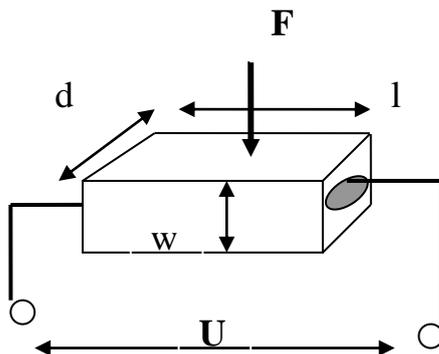


Рисунок 1 – Фоторезистор

Фототок в цепи, в которую включен освещенный полупроводник (фоторезистор), зависит не только от интенсивности освещения полупроводника, но и от приложенного напряжения, размера контактов, расстояния между ними, способа освещения. Рассмотрим фоторезистор, схематически изображенный на рисунке 1, а и представляющий собой прямоугольную пластинку однородного материала с размерами l, d, w . Схема включения фоторезистора и его вольтамперная характеристика показаны на рисунке 2. При равномерном поглощении излучения в объеме полупроводника (т. е. в случае, когда глубина проникновения света $> w$) плотность светового тока, текущего через полупроводник в поле с напряженностью $\vec{E} = U/l$

$$j_F = \Delta\sigma \frac{U}{l} = e N_q \eta \mu \tau \left(\frac{U}{l^2} \right).$$

Полный световой ток в цепи фоторезистора

$$I_F = j_F d w = e N_q \eta \mu \tau V \left(\frac{U}{l^2} \right)$$

где $V = lwd$ - объем освещенного образца. Множитель $N_q V = N_{qv}$ представляет собой количество квантов излучения, поглощаемых в секунду во всем объеме освещенного полупроводника V . Выражение можно переписать в виде

$$\frac{I_F}{e} = N_q \eta \mu \tau V \left(\frac{U}{l^2} \right) = N_{qv} \eta G$$

где $N_{qv}\eta$ - количество генерируемых в объеме пар носителей заряда; множитель G , равный отношению количества электрических зарядов, проходящих в секунду между электродами фоторезистора I_F/e к числу генерируемых в объеме пар носителей заряда $N_{qv}\eta$, называется коэффициентом усиления фототока:

$$G = \frac{I_F}{eN_{qv}} = \mu\tau\left(\frac{U}{l^2}\right)$$

Введем понятие времени дрейфа (времени пролета) носителей заряда между электродами фоторезистора. Это время равно расстоянию между электродами l , деленному на скорость дрейфа

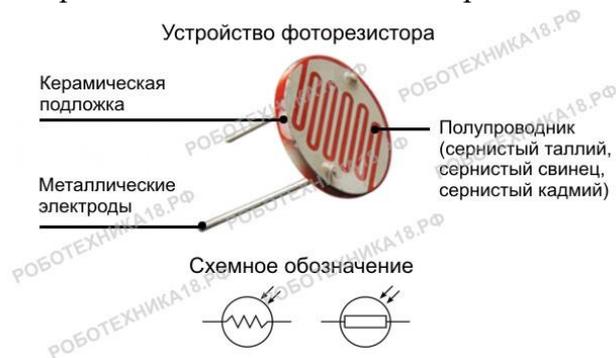
$$v_d = \mu\left(\frac{U}{l}\right);$$

$$G = \frac{\tau}{T};$$

$$T = \frac{l^2}{\mu U}$$

Поток зарядов через фоторезистор I_F/e может быть меньше поглощенного потока фотонов N_{qv} или превышать его - это зависит от приложенного напряжения U и расстояния между электродами l (от времени дрейфа носителей T и от характера электродов. Если электрическое поле в полупроводнике достаточно велико, время пролета носителей заряда может стать меньше времени их жизни $T < \tau$, и коэффициент усиления может существенно превышать единицу. Фоторезисторы из сульфида кадмия, например, характеризуются коэффициентом усиления $G \approx 10^5$.

Коэффициент усиления фототока зависит не только от параметров материала, характеризующих его фоточувствительность, но и от конструкции фоторезистора и величины приложенного напряжения. Величина времени жизни носителей заряда кроме чувствительности определяет и инерционность процессов изменения проводимости полупроводников. При рассмотрении механизма фотопроводимости было видно, что с прекращением освещения полупроводника равновесная концентрация носителей заряда (точно так же, как и с включением освещения стационарная концентрация неравновесных носителей) устанавливается не мгновенно - процессы нарастания и спада фотопроводимости носят релаксационный характер. Время, в течение которого устанавливается динамическое равновесие между скоростью генерации и скоростью рекомбинации носителей, т. е. постоянная времени процессов нарастания и спада фотопроводимости, в рассмотренном простейшем случае линейной рекомбинации совпадает со временем жизни носителей заряда.



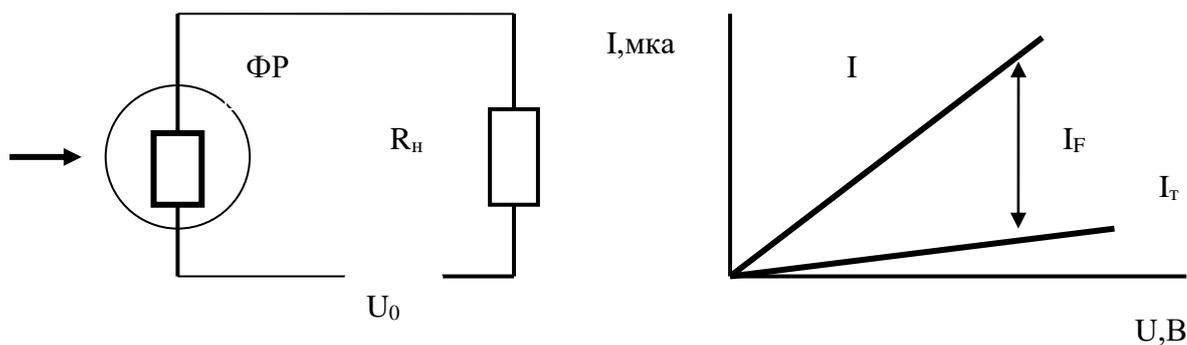


Рисунок 2 – Схема включения фоторезистора (а) и его вольт-амперные характеристики

Время установления стационарной величины фотопроводимости называют временем фото ответа фоторезистора, а обратную ему величину— скоростью фотоответа. Чем меньше скорость фотоответа, т. е. чем больше постоянная времени релаксации фотопроводимости, тем более инерционен фотоприемник, изготовленный из этого материала. Поскольку одна и та же величина – время жизни носителей заряда – определяет и чувствительность, и инерционность процесса фотопроводимости, можно ожидать, что наиболее фоточувствительные материалы окажутся и наиболее инерционными.

Характеристики и параметры фоторезисторов

Фоторезисторы обычно включают в цепь постоянного или переменного тока последовательно с сопротивлением нагрузки, как это показано на рисунке 2. В электрическом отношении они ничем не отличаются от обычных резисторов, применяемых, например, в радиотехнике. Вольт-амперные характеристики фоторезисторов и в темноте (когда в цепи течет темновой ток I_T) и при освещении, как правило, линейны, т. е. для них выполняется закон Ома. В некоторых случаях при повышении напряжения линейность вольт-амперных характеристик нарушается - либо из-за «неомичности» контактов, либо из-за контактных явлений на границах зерен поликристаллического материала. Типичные вольт-амперные характеристики показаны на рисунке 2. Здесь I_T - темновой ток, I - ток в цепи освещенного фоторезистора, а их разность $I_F = I - I_T$ представляет собой собственно фототок. Световые характеристики фоторезисторов обычно строят в зависимости от освещенности их поверхности, а не от величины светового потока (из-за малости рабочей площадки прибора). Эти характеристики называют люкс-амперными. Световые характеристики фоторезисторов нелинейны, и пропорциональная зависимость между фототоком и освещенностью может наблюдаться только в узком интервале изменения освещенности и при малых ее величинах. При освещении фоторезистора характеризуется величиной времени фотоответа. Если увеличить частоту следования световых импульсов (частоту модуляции светового потока f) так, что период колебания освещенности станет меньше, чем время фотоответа, амплитуда переменной составляющей фототока будет снижаться в соответствии с выражением

$$I_f = \frac{I_0}{1+(2\pi f \tau_0)^2}.$$

Инерционность процесса нарастания или уменьшения фототока характеризуется постоянной времени τ_0 , в течение которого фототок увеличивается или уменьшается в e

(2,73) раз, считая, что изменение тока происходит по экспоненциальному закону. Наименьшую инерционность имеют сернисто-свинцовые фоторезисторы (40-400 мксек), а наибольшую – фоторезисторы на основе сернистого кадмия (1-140 мсек).

Исследование ампер-люменной характеристики фоторезистора ФСК-2Г.



1. Подать на лампочку от источника напряжение 12 вольт. При этом напряжении световой поток лампы составляет 21 лм.
2. Подать на фоторезистор напряжение 50;60 и 70 В. И по микроамперметру фиксировать значения тока. Диаметр фоторезистора 3 мм.
3. Изменяя расстояние лампы от фоторезистора, снять зависимость тока от величины светового потока для трех значений напряжения.
4. По полученным данным определить Ампер-люменную, ампер-ваттную и ампер-люксовую чувствительность фоторезистора.
5. Определить коэффициент усиления для всех трех значений напряжения.