

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

**Элементы и устройства интегральной
оптоэлектроники**

Электронные методические указания
к лабораторным работам

САМАРА

2012

УДК 621.3

П 180

Составители : **Паранин Вячеслав Дмитриевич,**
Матюнин Сергей Александрович

Элементы и устройства интегральной оптоэлектроники [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В. Д. Паранин, С. А. Матюнин. - Электрон. текстовые и граф. дан. (0,7 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-R).

Режим доступа: <http://rtfmoodle.ssau.ru/course/view.php?id=66>

Методические указания к лабораторным работам предназначены бакалаврам радиотехнического факультета по направлению подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника», изучающих дисциплину «Элементная база интегральной оптоэлектроники» в 8 семестре.

Электронные методические указания разработаны на кафедре электронных систем и устройств.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 Лабораторная работа «Исследование параметров волоконно-оптической линии связи».....	5
3 Лабораторная работа «Исследование полупроводниковых фотоприемников».....	16
4 Лабораторная работа «Исследование работы светоизлучающих диодов».....	25
5 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений информационно-измерительной техники и техники связи является интегральная оптоэлектроника. Объединяя достижения физики твердого тела, интегральной и волоконной оптики, а в последнее время – нанотехнологий и нанофотоники, данное направление позволяет обеспечить создание и комплексную миниатюризацию функциональных элементов и устройств. Становится возможным существенное увеличение информационной емкости каналов связи, и, следовательно, повышение качества управления объектами, осуществление мониторинга сложных технологических процессов в реальном времени.

Применение интегральной оптоэлектроники в сочетании с волоконно-оптическими линиями связи позволяет создать мультисенсорные системы для эффективного управления авиационной и космической техникой, промышленными объектами различного назначения. Несомненными достоинствами таких систем являются пожаро- и взрывобезопасность, малые габариты и вес, химическая инертность (стойкость), гальваническая отвязка от токонесущих конструкций, возможность осуществления бесконтактных и дистанционных измерений, возможность осуществления мультиплексирования передаваемой информации.

В методических указаниях рассматриваются элементы и устройства интегральной оптоэлектроники. Изучаются основные параметры волоконно-оптических линий связи и разъемных соединений, полупроводниковых источников и приемников оптического излучения видимого и инфракрасного диапазонов. Уделяется внимание нормативной документации, устанавливающей виды параметров оптических волокон и методики их измерения.

Лабораторная работа

«Исследование параметров волоконно-оптической линии связи»

Цель работы: исследование затухания сигнала волоконно-оптической линии связи методом вносимых потерь.

Краткие теоретические сведения

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) нашли широкое применение в передаче информации. Облaстями применения ВОЛС являются наземная, бортовая, судовая связь, включая телевидение и Интернет, измерительные системы [1, 2]. Основными конкурентными преимуществами ВОЛС перед традиционными электрическими кабельными сетями являются:

- искро-, пожаро- и взрывобезопасность;
- высокая механическая прочность;
- малые габариты и вес;
- простота и технологичность конструкции;
- высокая надежность;
- химическая инертность (стойкость);
- гальваническая отвязка от токонесущих конструкций;
- возможность осуществления бесконтактных и дистанционных измерений;
- возможность осуществления мультиплексирования передаваемой информации.

Как показывают оценки [3], оптическое волокно весит в 9-10 раз меньше по сравнению с коаксиальным кабелем при одинаковой информационной емкости линии. Примерами применения ВОЛС в авиационной технике является замена кабельной системы самолета А-7 на волоконно-оптическую. Это

позволило уменьшить массу проводников с 40 кг до 1,7 кг. Также известен факт использования волоконно-оптических линий в составе бортового комплекса управления стратегического бомбардировщика B-1B Lancer [4] и истребителя пятого поколения F-22A Raptor [4]. В 2011 г. агентство передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA) заявило о дальнейшем развитии и внедрении бортовых ВОИС со спектральным уплотнением в рамках программы NEW-HP [5].

К основным параметрам оптического волокна относят:

1. Геометрические:

- диаметр оболочки, мкм;
- диаметр сердцевины, мкм;
- некруглость оболочки, %;
- некруглость сердцевины, %;
- неконцентричность структуры «серцевина – оболочка», мкм;
- диаметр неокрашенного первичного покрытия, мкм;
- диаметр окрашенного первичного покрытия, мкм;
- неконцентричность структуры «первичное защитное покрытие - оболочка», мкм.

2. Механические:

- уровень напряжения при испытании на разрыв, ГПа;
- среднее усилие снятия первичного защитного покрытия, Н;
- максимальное усилие снятия первичного защитного покрытия, Н;
- радиус собственного изгиба, м.

3. Передаточные:

- коэффициент затухания, дБ/км;
- минимальный коэффициент широкополосности, МГц*км;
- числовая апертура, отн. ед.;
- длина волны нулевой хроматической дисперсии, нм;

- крутизна спектральной характеристики дисперсии в окрестностях нулевой волны дисперсии, пс/нм²*км;
- номинальный диаметр модового поля на выбранной длине волны, мкм (для одномодовых волокон);
- длина волны отсечки, нм (для одномодовых волокон);
- потери на макроизгибах для 100 витков диаметром 75 мм (для одномодовых волокон).

4. Стойкость к воздействию окружающей среды.

- стойкость к повышенной температуре при повышенной влажности (по методике IEC 60793-1-50);
- стойкость при повышенной температуре при нормальной влажности (по методике IEC 60793-1-51);
- стойкость к изменению температуры (по методике IEC 60793-1-52);
- водостойкость (по методике IEC 60793-1-53).

В настоящее время стандартизацией параметров оптических волокон на международном уровне занимаются две организации: Международный союз электросвязи ИТУ-Т и Международная электротехническая организация ИСО. Документы названных организаций взаимно дополняют друг друга. Классификация ИТУ-Т описана в рекомендациях серии G.65X. Основные положения этой классификации содержатся в международных стандартах серии IEC 60793-2. Общим признаком, положенным в основу классификации IEC, является деление оптических волокон по режиму работы волокна в смысле направляемых мод. Внутри каждой группы выделены классы и подклассы волокон. Обозначение многомодовых волокон начинается с символа А, многомодового – с символа В.

Основным признаком отнесения многомодового волокна к определенному классу является материалы его оболочки и сердцевины. Стандарты серии IEC 60793-2 предусматривают многомодовые волокна типов

стекло/стекло, стекло/полимер и полимер/полимер, которые образуют классы А1-А4 (таблица 1). Деление на подклассы осуществляется по номинальному диаметру сердцевины и оболочки. При этом в качестве обозначения подкласса используется термин «категория».

Таблица 1 – Классы многомодовых светодводов по IEC 60793-2

Класс	Материал сердцевины и оболочки	Диаметр сердцевины / оболочки			
		a	b	c	d
A1	стекло/стекло	50/125*	62,5/125	-	100/140
A2	стекло/стекло	200/240	-	-	-
A3	стекло/полимер	200/280	-	-	-
A4	полимер/полимер	980/1000	735/750	485/500	980/1000

* волокно G.651 по классификации ITU-T

Описание одномодовых волокон приведено в стандарте IEC 60793-2-50. Данный документ в действующей редакции предусматривает световоды трех классов (таблица 2). Признаком отнесения одномодового световода к определенному классу является рабочий диапазон длин волн и длина волны нулевой дисперсии. Класс В1 представляет собой т.н. стандартные волокна и включает в себя также конструкции, разработанные на их основе. Волокна со смещением дисперсии объединены в класс В2. Класс В4 представляет собой волокна с ненулевой смещенной дисперсией.

Таблица 2 – Классы одномодовых волокон по IEC 60793-2-50

Класс	Обозначения		Длина волны нулевой дисперсии, нм	Рабочая длина волны, нм	Тип волокна
	ITU	ISO/IEC 11801			
B1.1	G.652	OS1	1300	1300	SF

продолжение таблицы 2

B1.2	G.654	-	1300	1550	-
B1.3	G.652C	OS2*	1300-1324	1300-1625	LWR, ZWR
B2	G.653	-	1550	-	DSF
B4	G.655	-	-	1550	NZDSF
-	G.656**	-	<1460	1460-1625	-

* в настоящее время не стандартизовано; ** т.н. волокна с ненулевой смещенной дисперсией для широкополосной оптической передачи

Одним из важнейших параметров оптического волокна является затухание. Оно показывает ослабление сигнала на единицу длины пути, проходимого излучением в оптическом волокне. Типичные значения затухания для кварцевого волокна приведены на рисунке 1 (по данным [1]).

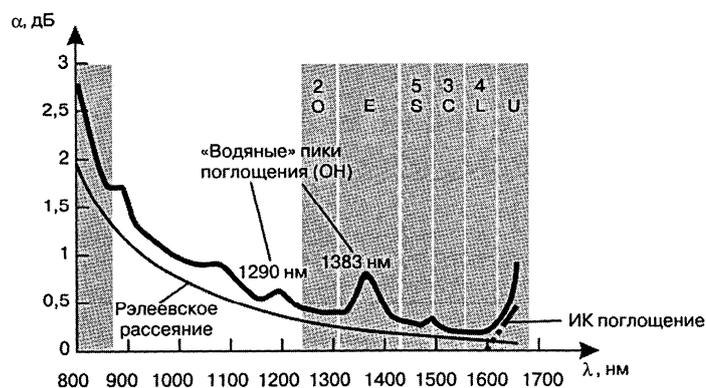


Рисунок 1 – Характеристика затухания кварцевого оптоволокна

Из данных рисунка 1 следует, что существуют спектральные области с минимальным затуханием. Это используемые в настоящее время диапазоны длин волн, имеющие собственные обозначения (таблица 3).

Таблица 3 – Рабочие диапазоны оптического волокна

Диапазон	Длина волны, нм	Пояснение	Типичные потери, дБ/км
А-диапазон	790-910	-	2-3
О-диапазон	1260-1360	Основной (original)	0.35
Е-диапазон	1360-1460	Расширенный (extended)	0.31-0.55
S-диапазон	1460-1530	Коротковолновый (short wavelength)	0.25
С-диапазон	1530-1565	Стандартный (conventional)	0.19
L-диапазон	1565-1625	Длинноволновый (long wavelength)	0.20
U-диапазон	1625-1675	Сверхдлинноволновый (ultralong wavelength)	0.22

Принято считать, что затухание сигнала обусловлено потерями на рассеяние и потерями на поглощение. Потери на рассеяние вызываются линейными и нелинейными эффектами. Линейная составляющая обусловлена стационарными пространственными флуктуациями плотности материала сердцевины, которые всегда присутствуют в расплавленной кварцевой форме и сохраняются после отверждения. Данные флуктуации сопровождаются изменением показателя преломления. Поэтому при попадании оптических лучей на эти неоднородности (так называемые рэлеевские центры) они меняют свое направление распространения и высвечиваются в окружающее

пространство (рисунок 2). Интенсивность линейного рассеяния не зависит от мощности передаваемого сигнала.

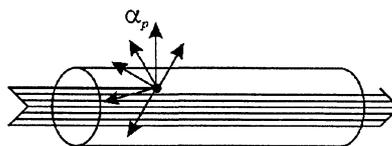


Рисунок 2 – Пояснение механизма линейного релеевского рассеяния

Нелинейное рассеяние имеет рамановскую и мандельштам-бриллюэновскую составляющие. Они возникают при рассеянии света на переменных во времени флуктуациях показателя преломления. Причина возникновения данных флуктуаций заключается в тепловом колебании плотности среды и внутримолекулярными колебаниями соответственно. Внешне этот эффект проявляется путем возникновения излучения с длинами волн, отличными от исходной. Явление нелинейного рассеяния становится заметным в одномодовых волокнах при мощностях излучения 30 мВт и более. Следует отметить, что для передачи информации обычно используются значительно меньшие мощности оптических сигналов.

Потери на поглощение вызваны поглощением света молекулами воды и гидроксильными группами, присутствующими в оптическом волокне. Вклад в поглощение дают также ионы железа, меди, кобальта, ванадия и хрома. Для обеспечения низких потерь концентрация этих веществ должна поддерживаться на уровне миллиардных массовых долей. В составе потерь на поглощение отдельно выделяют резонансное поглощение молекулами SiO_2 на длинах волн 9, 12.5, 21 мкм. Данная составляющая потерь становится заметной при длинах волн больших 1,7 мкм.

Потери на релеевское рассеяние и поглощение определяют нижний теоретический предел потерь кварцевого волокна в окрестности длины волны 1,5 мкм. Однако минимальная величина потерь недостижима по двум причинам. Во-первых, существует конечная степень очистки исходных

материалов. В практически интересном для техники оптической связи диапазоне 0,8-1,7 мкм наибольший вклад вносят гидроксильные группы ОН и ионы переходных металлов ряда железа (никель, хром, медь, железо и т.д.). Во-вторых, в процессе изготовления оптического волокна возникают кабельные потери. Они обусловлены различными деформациями волокна при наложении покрытий и защитных оболочек, а также скруткой волокон в кабеле. При хорошо отработанной технологии производства оптических кабелей для многомодового волокна кабельные потери не превышают 0,1 дБ/км.

Таким образом, область эффективного использования кварцевых волокон ограничена диапазоном видимого и ближнего ИК диапазонов. Для среднего и дальнего ИК диапазонов необходимы иные материалы, наиболее перспективными из которых считаются флюоридные и сульфидные стекла.

Для измерения затухания выбран метод вносимых потерь. Метод вносимых потерь основан на использовании вспомогательного оптического волокна. Метод применим для волокон, оконцованных оптическими разъемами. При измерении необходимо обеспечить постоянство вводимой в волокно мощности оптического сигнала, а также неизменность модового состава. Для измерения выбирают волокна с известной длиной и уровнем потерь на оптических разъемах. Качество скола и механическую чистоту поверхности торца оптической вилки контролируют с помощью микроскопа с увеличением 100-200х. Перед соединением торцы должны быть извлечены из защитной пластиковой гильзы и очищены безворсовой салфеткой, смоченной в изопропиловом спирте.

Измерение затухания производится на следующей установке (рисунок 1).



Рисунок 3 – Схема установки для измерения затухания сигнала методом вносимых потерь

В качестве источника излучения может использоваться лазерный диод или полупроводниковый светодиод с известной длиной волны. Как правило, такие источники выпускаются на длины волн 850, 1310, 1550 нм, что связано с областями минимального поглощения кварцевого оптического волокна. Положение источника относительно принимающего торца волокна должно быть неизменным в течение всего времени измерения. Мощность оптического излучения также должна быть стабилизирована. Обычно это достигается стабилизацией питающего напряжения и поддержанием неизменной температуры в корпусе источника излучения с помощью микрохолодильника Пельтье.

Смеситель мод обеспечивает эталонное возбуждение оптического волокна с модовым составом, идентичным установившемуся режиму. Неизменность модового состава на выходе волокна контролируется с помощью ПЗС-камеры. Критерием установившегося модового распределения является идентичность распределения интенсивности на выходе волокна и смесителя мод. В некоторых случаях смеситель мод и подавитель мод конструктивно объединены в одном элементе.

Приемник излучения должен иметь известную (калиброванную) характеристику в спектральном диапазоне излучения источника. Излучающий торец волокна должно жестко фиксироваться относительно фотоприемной площадки. В процессе измерения фотоприемник должен захватывать весь конус излучения волокна, при этом его угловое положение относительно данного конуса должно оставаться неизменным.

Порядок выполнения работы:

1. Проверить работоспособность источника и приемника оптического излучения.

2. Собрать измерительную схему согласно рисунку 3.
3. Подключить оптическое волокно к источнику (смесителю мод) и приемнику излучения. Измерить мощность оптического сигнала для каждой из исследуемых длин волн. Данные измерения провести не менее 3 раз, определив тем самым величину мощности P_2 .
4. Отсоединить измеряемое оптическое волокно и подключить смеситель мод к приемнику излучения. Измерить оптическую мощность P_1 для каждой из исследуемых длин волн.
5. Вычислить полные потери $\Delta P(\lambda)$ в исследуемом волокне, используя формулу:

$$\Delta P(\lambda) = P_1(\lambda) - P_2(\lambda) - P_0,$$

где P_0 – паспортное значение потерь в оптическом соединителе, дБ.

6. Рассчитать коэффициент затухания $\alpha(\lambda)$ исследуемого волокна по формуле:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Delta P(\lambda)}{L},$$

где L – длина исследуемого волокна, м.

Содержание отчета:

1. Описание источников потерь оптического волокна.
2. Описание экспериментальной установки и методики измерения потерь.
3. Данные затухания в исследуемом волокне для доступных длин волн.
4. Выводы и рекомендации по выбору длины волны источника излучения.

Контрольные вопросы:

1. Применение оптического волокна для передачи данных: области использования, основные преимущества.

2. Основные параметры и характеристики оптического волокна.
3. Классификация оптических волокон.
4. Виды потерь в кварцевом оптическом волокне.
5. Окна прозрачности и рабочие диапазоны кварцевого оптического волокна.
6. Основные методы измерения потерь в оптическом волокне.

Лабораторная работа

«Исследование полупроводниковых фотоприемников»

Цель работы: изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства и параметры полупроводниковых фотоприемников.

Полупроводниковые фотоприемники относятся к группе фотоэлектрических приемников излучения (ПИ). Данная группа делится на две подгруппы - ПИ на основе внутреннего фотоэффекта и ПИ на основе внешнего фотоэффекта. В фотоэлектрических ПИ фотоны взаимодействуют непосредственно с кристаллической решеткой материала приемника, высвобождая носители заряда. Если носители заряда остаются в полупроводнике, говорят, что наблюдается внутренний фотоэффект. Если внутренний фотоэффект возникает в системах из двух различных материалов (металл-полупроводник, полупроводник-полупроводник и т.д.), то при освещении контактной области индуцируется фотоЭДС. Это явление называют вентильным фотоэффектом, а ПИ – вентильными или фотоэлементами с запирающим слоем. Если в качестве контактирующих материалов использованы полупроводники с n- и p-проводимостью, такой ПИ называют фотодиодом. Фотодиоды могут работать в фотогальваническом режиме с возникновением фотоЭДС, а также в фотодиодном режиме с приложением обратного напряжения к переходу, когда при изменении освещенности меняется значение обратного тока.

ПИ, подобные фотодиодам, но представляющие собой структуры с p-n-p переходами и обладающие свойством внутреннего усиления фототока, называют фототранзисторами. ПИ на p-n-p-n структурах, переходящие при освещении из закрытого состояния в открытое в прямом направлении, называют фототиристорами.

Фоторезисторами называют ПИ, проводимость которых изменяется под действием света. Данное изменение в простейшем случае регистрируется в виде изменения тока на нагрузочном сопротивлении. С целью исключения шумовой подсветки используют несколько фоторезисторов, шумовое и объектное освещение на которые подается отдельно.

Параметром фотоприемника называется величина, характеризующая определенное свойство ПИ и служащая критерием оценки качества при работе в определенных условиях. Параметр, как правило, представляет собой численное значение, вычисляемое по формуле или экспериментально измеренное.

Характеристикой фотоприемника называется зависимость, описывающая изменение какого-либо параметра от внешних факторов. Характеристика обычно выражается формулой, графиком или таблицей.

К основным параметрам приемников излучения относятся:

1. Параметры чувствительности:

- интегральная чувствительность $S_{\text{инт}}$;
- интегральная токовая чувствительность S_I ;
- интегральная вольтовая чувствительность S_U ;
- монохроматическая чувствительность S_λ ;
- импульсная чувствительность $S_{\text{имп}}$;
- коэффициент использования потока излучения χ ;
- эффективная ширина полосы чувствительности $\Delta\lambda_{\text{эфф}}$.

2. Пороговые шумовые параметры:

- ток шума $I_{\text{ш}}$;
- напряжение шума U_i ;
- пороговый поток в заданной полосе $\Phi_{\text{п}}$;
- пороговый поток в единичной полосе $\Phi_{\text{п1}}$;
- удельный пороговый поток $\Phi_{\text{уд}}$;
- обнаружительная способность D ;

- удельная обнаружительная способность D^* ;
- радиационный пороговый поток $\Phi_{\text{рад.п}}$;
- квантовая пороговая чувствительность $\Phi_{\text{р.лп}}$.

3. Временные параметры:

- собственная постоянная времени τ ;
- граничная частота модуляции $f_{\text{гр}}$;
- темновое сопротивление приемника $R_{\text{т}}$;
- динамическое сопротивление $R_{\text{д}}$;
- емкость приемника C .

4. Спектральные параметры:

- максимум спектральной характеристики λ_{max} ;
- коротковолновая граница спектральной характеристики $\lambda_{\text{к}}$;
- длинноволновая граница спектральной характеристики $\lambda_{\text{д}}$.

5. Эксплуатационные параметры:

- рабочее напряжение $V_{\text{р}}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность P_{max} ;
- температурный коэффициент фототока $\alpha_{\text{т}}$;
- нестабильность параметров во времени.

К основным характеристикам ПИ относятся следующие:

1. Спектральные характеристики:

- абсолютная спектральная характеристика $S_{\text{абс}}(\lambda)$;
- относительная спектральная характеристика $S(\lambda)$.

2. Вольтовые характеристики:

- вольтамперная характеристика $I(V)$;
- вольтовая характеристика чувствительности $S(V)$;
- вольтовая характеристика тока шума $I_{\text{ш}}(V)$;
- вольтовая характеристика напряжения шума $V_{\text{ш}}(V)$.

3. Характеристики зависимости параметров ПИ от потока излучения:

- люкс-омическая характеристика $R(E)$;
- энергетическая характеристика фототока $I_{\phi}(\Phi)$;
- энергетическая характеристика напряжения фотосигнала $V_c(\Phi)$.

4. Фоновые характеристики:

- фоновая характеристика сопротивления $R(\Phi_{\phi})$;
- фоновая характеристика чувствительности $S(\Phi_{\phi})$;
- фоновая характеристика тока шума $I_{ш}(\Phi_{\phi})$;
- фоновая характеристика напряжения шума $V(\Phi_{\phi})$;
- фоновая характеристика обнаружительной способности $D^*(\Phi_{\phi})$.

5. Частотные характеристики:

- частотная характеристика чувствительности $S(f)$;
- фазовая характеристика $\varphi(f)$;
- частотная характеристика удельной обнаружительной способности $D^*(f)$;
- частотная характеристика спектральной плотности тока шума $I_{ш}(f)$;
- частотная характеристика спектральной плотности напряжения шума $V_{ш}(f)$.

6. Температурные характеристики.

7. Временные характеристики.

8. Пространственные характеристики.

Данная работа посвящена исследованию параметров фоторезисторов. Основным элементом фоторезистора является тонкий слой полупроводникового материала, помещенного на изолирующую подложку. Т.е. фоторезисторы представляют собой пленки или тонкие пластины фоточувствительного полупроводникового материала, снабженные двумя невыпрямляющими контактами для включения во внешнюю цепь (рисунок 1). Фоторезисторы одинаково проводят ток в обоих направлениях (неполяры), поэтому их можно питать как постоянным, так и переменным напряжением. Обычно фоторезисторы создают на основе собственного или примесного (для инфракрасной области) поглощения.

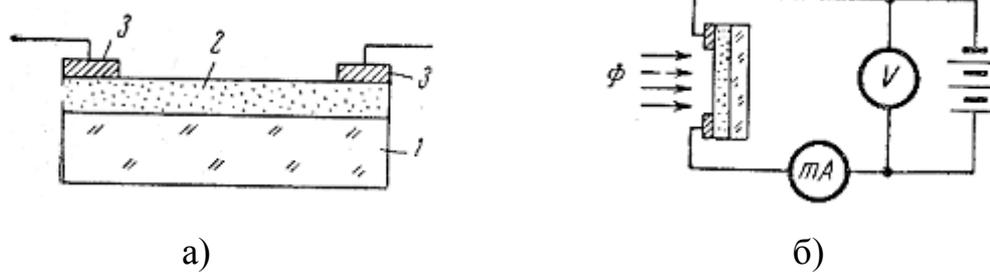


Рисунок 1 – Конструкция фоторезистора

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (рисунок 1, б) и не освещен, то в его цепи протекает темновой ток:

$$I_T = B\sigma_0 U, \quad (1)$$

где B – постоянный коэффициент, определяемый только геометрическими размерами фоточувствительного слоя; $\sigma_0 = e\mu_p p_0 + e\mu_n n_0$ – темновая электропроводность полупроводника (μ_p , μ_n – подвижности дырок и электронов). При освещении фоторезистора проводимость светочувствительного слоя возрастает и через прибор протекает световой ток:

$$I_C = B\sigma U, \quad (2)$$

где $\sigma = \sigma_0 + e\mu_p \Delta p + e\mu_n \Delta n$ – электропроводность материала при освещении; Δn , Δp – концентрация неравновесных электронов и дырок, образовавшихся в результате внутреннего фотоэффекта.

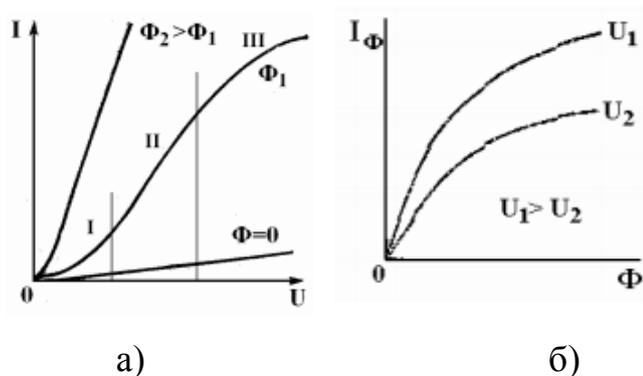


Рисунок 2 – Основные характеристики фоторезисторов: а) вольтамперная; б) люксамперная

Параметром ВАХ фоторезистора служит световой поток, который определяет сопротивление фоторезистора. При малом напряжении ВАХ близка к квадратичной (рисунок 2,а область I). При достаточно большом напряжении ВАХ практически линейна (рисунок 2,а, область II), но в ограниченной области. Световая характеристика фоторезистора $I_{\Phi} = f(\Phi)$ (зависимость фототока $I_{\Phi} = I_C - I_T$ от светового потока Φ , падающего на прибор) имеет нелинейный характер (рисунок 2,б), которую в общем случае можно представить в виде:

$$I_{\Phi} = AU\Phi^n, \quad (3)$$

где A , n – некоторые константы, $0 < n < 1$ (типичное значение $n = 1/2$). Замедление скорости роста фототока при увеличении светового потока происходит потому, что с ростом концентрации неравновесных носителей возрастает вероятность их рекомбинации и уменьшается время жизни. Существенное значение при использовании фоторезисторов имеют их частотные характеристики. При включении и выключении света фототок возрастает до максимума не мгновенно. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. При малом уровне инжекции нарастание и спад фототока происходит по закону:

$$I_{\Phi} = I_{\Phi 0} e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

где τ – время жизни носителей в полупроводнике, $I_{\Phi 0}$ – стационарное значение фототока. Фоторезисторам свойственна значительная инерционность. Их чувствительность заметно уменьшается на частоте 100–1000 Гц.

Поскольку сила тока, протекающего через фоторезистор, невелика, его применяют совместно с усилителями. На рисунке 3 показано, как с помощью фоторезистора можно управлять режимом работы транзистора.

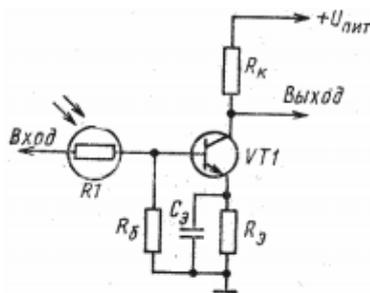


Рисунок 3 – Схема включения фоторезистора

В качестве полупроводникового материала в фоторезисторах обычно используют: в видимой области оптического диапазона – сульфид кадмия CdS (фоторезисторы ФСК, СФ2, ФПФ), для видимого и ИК диапазона – селенид кадмия CdSe (фоторезисторы ФСД, СФ3), в ИК-диапазоне с длинами волн 1 ... 5 мкм – сульфид свинца PbS (фоторезисторы ФСА) и селенид свинца PbSe (фоторезисторы СФ4). На рисунке 4 приведены спектральные характеристики фоторезисторов. В таблице 1 представлены характеристики некоторых фоторезисторов.

Таблица 1 – Основные параметры фоторезисторов

Фоторезистор	Рабочее напряжение, В, не более	Темновое сопротивление, Ом, не менее	Темновое ток, мкА, не более	Общий ток при $\Phi=200$ лк, мА, не менее	Отношение темнового сопротивления к световому, не менее
ФСК-6	50	3,3	15	1,5	100
ФСД-1	20	2	10	1,5	150
ФСА-1	2..50	0,02..1	-	-	1,2

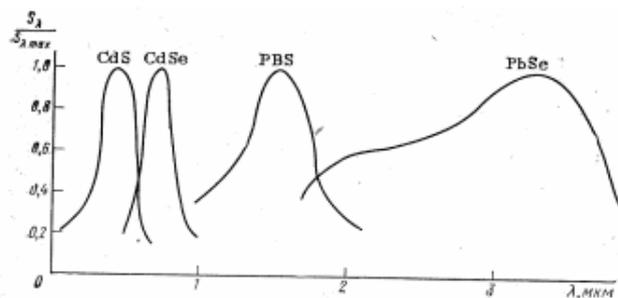


Рисунок 4 – Спектральные характеристики некоторых фоторезисторов

Порядок выполнения работы:

1. Подключить к макету источники напряжения и измерительные приборы.
2. Определить световые характеристики фоторезистора ФСД-1, используя синий, зеленый, желтый и красный светодиоды и задавая ток, протекающий через светодиоды, равный 1, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 мА. Построить зависимости $I(\Phi)$, считая, что световой поток светодиодов линейно зависит от силы тока, протекающего через светодиод.
3. Получить вольтамперные характеристики фоторезистора ФСД-1, используя светодиод, соответствующий максимальной спектральной чувствительности фоторезистора ФСД-1 (задавать следующие напряжения на фоторезисторе: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1, 3, 5, 7, 9 В, ток через светодиод 20 мА).

Содержание отчета:

1. Описание работы фоторезистора.
2. Вольтамперная характеристика фоторезистора ФСД-1 в табличном и графическом виде.
3. Люксамперная характеристика фоторезистора ФСД-1 в табличном и графическом виде, построенная для различных светодиодов.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
2. Объясните причину нелинейности световой характеристики фоторезистора в области больших световых потоков.
3. Какие параметры полупроводникового материала важны для работы фоторезистора?
4. В чем заключаются особенности включения фоторезисторов в электрические схемы?

полупроводника (б): I – переходы типа «зона-зона»; II – переходы типа «зона-примесный уровень»; III – переход с возбуждением электрона в зоне проводимости. Сплошная линия – излучательные переходы, штриховая – безызлучательные

В идеальном полупроводнике при температуре абсолютного нуля валентная зона полностью занята электронами, а зона проводимости полностью свободна. Соответственно, полупроводник является изолятором. При более высоких температурах вследствие теплового возбуждения часть электронов переходит в зону проводимости, а в валентной зоне возникают вакантные места – дырки. Термодинамическое равновесие характеризуется наличием равновесных концентраций носителей – дырок и электронов. Последние способны рекомбинировать с носителями противоположного знака при их внешней инжекции.

Если приложить к переходу типа p-i-n напряжение в прямом направлении, то в зоне i появятся носители обоих знаков. При рекомбинации этих носителей энергия от внешнего источника напряжения передается кристаллической решетке полупроводника в виде тепловой или выделяется в виде световой энергии. Потенциальный барьер между областями p и n снижается, и электроны из n-области диффундируют в область объемного заряда (зона i на рисунке 1, а) и в p-область, создавая там избыточную, т.е. неравновесную концентрацию. Аналогично возникает избыточная концентрация дырок в n-области 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) непосредственно в зоне проводимости. В

результате межзонной или примесной рекомбинации при исчезновении пары «электрон-дырка» выделяется энергия, определяемая в первом случае шириной запрещенной зоны ΔE_z , а во втором – примесным уровнем энергии ΔE_p . Энергия может выделяться в виде светового кванта или передаваться в виде тепла (фонона) кристаллической решетке. В третьем случае энергия рекомбинирующей пары передается третьему свободному носителю заряда, который в дальнейшем передает энергию в виде фонона. Переходы с испусканием световых квантов называется излучательными, фононов – безызлучательными.

Для излучательных переходов между зоной проводимости и валентной зоной справедливо соотношение:

$$\lambda[\mu\text{m}] = \frac{1,24}{\Delta E_z[\text{eV}]}, \quad (1)$$

где λ – длина волны в микрометрах; ΔE_z – ширина запрещенной зоны полупроводника в электрон-вольтах. Для работы в диапазоне видимого излучения (0,38–0,78 мкм) необходимы полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5–3,0 эВ. Поэтому основные материалы полупроводниковых излучателей – это соединения $A^{III}B^V$: GaP, GaAs, а также твердые растворы на их основе.

Светодиодная структура представляет собой электронно-дырочный переход, в котором одна из областей является эмиттерной, т. е. инжектирующей основные носители заряда (в данном случае – это n-область), а другая (в данном случае – p-область) – базовой. При приложении прямого напряжения потенциальный барьер понижается и начинается инжекция неосновных носителей: дырок – в n-область и электронов – в p-область. Инжектированные неосновные носители рекомбинируют вблизи p-n перехода, обеспечивая генерацию оптического излучения. Обычно излучающей является область только по одну сторону p-n перехода. Для того,

чтобы количество инжектированных носителей было максимально именно в активной области, в неактивную область вводят больше примеси. В результате, в излучающей структуре инжекция практически односторонняя. Зависимость параметров излучения от длины волны называется спектральной характеристикой излучающего диода. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. Так как рекомбинация обычно происходит не только между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны, а между двумя группами энергетических уровней, лежащими в зоне проводимости и в валентной зоне, то спектр излучения оказывается размытым. Примеры спектральных характеристик приведены на рисунке 2.

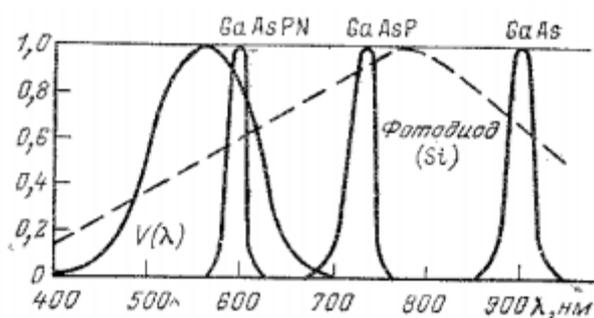


Рисунок 2 – Спектральные характеристики светодиодов

Параметры светодиода как элемента электрической цепи определяются его ВАХ (рисунок 3). Различия прямых ветвей ВАХ светодиодов, излучающих свет с разной длиной волны, связаны с различием ширины запрещенной зоны применяемых материалов. Чем меньше длина волны излучения, тем больше ширина запрещенной зоны и больше прямое падение напряжения на излучающем диоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви ВАХ имеют малое допустимое обратное напряжение, так как ширина p-n перехода в излучающих диодах незначительна. При работе

в схеме с большими обратными напряжениями последовательно со светодиодом необходимо включать обычный диод, имеющий достаточное значение допустимого обратного напряжения.

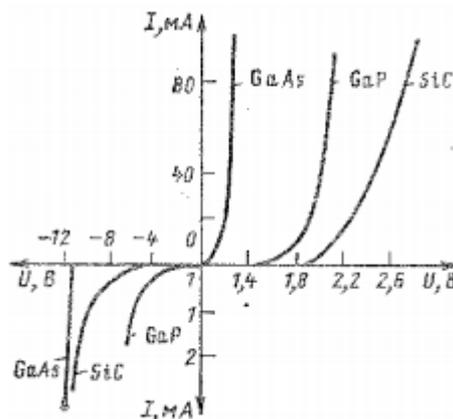


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики светодиодов

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока. Время переключения $t_{пер}$ складывается из времени включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ излучения. Инерционность светодиода определяется процессом перезарядки барьерной емкости р-п-перехода и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области диода. Важной особенностью светодиодов является присущая им деградация – постоянное уменьшение мощности излучения при длительном протекании через прибор прямого тока. Деградацию связывают с увеличением концентрации центров безызлучательной рекомбинации за счет перемещения в электрическом поле неконтролируемых примесных атомов. Также играет роль дезактивация части излучательных центров за счет их перехода из узлов кристаллической решетки в междоузлия. Простейшая схема включения светодиода – схема с токоограничивающим резистором

(рисунок 4). В этом случае рабочий режим светодиода определяется пересечением ВАХ и нагрузочной линии в соответствии с соотношением:

$$I_{np} = \frac{U_{\Pi} - U_{np}}{R}, \quad (2)$$

где U_{Π} – напряжение источника питания, I_{np} , U_{np} – прямой ток через светодиод и прямое падение напряжения на нем, R – сопротивление токоограничивающего резистора. Необходимость применения токоограничивающего резистора объясняется сильной нелинейностью ВАХ светодиода. Ток, протекающий через светодиод, не должен превышать 10–50 мА. Превышение оптимальной силы тока существенно сокращает срок службы светодиода. При отсутствии токоограничивающего резистора необходимо с высокой точностью задавать напряжение питания, так как из-за нелинейного характера ВАХ небольшие изменения прямого напряжения на светодиоде приводят к существенному изменению тока, протекающего через светодиод.

Порядок выполнения работы:

1. Собрать схему в соответствии с рисунком 4.

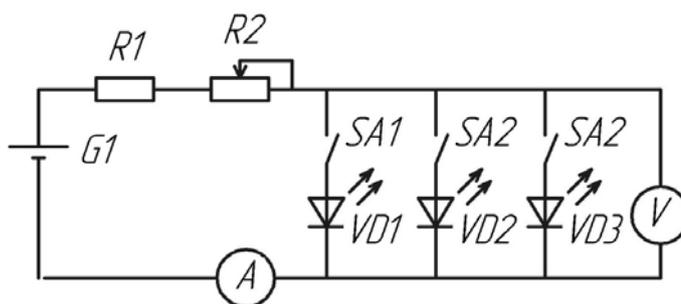


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная стенда

2. Подключить один из исследуемых светодиодов к цепи питания с помощью переключателя SA.

3. Включить источник напряжения 5 В.
4. Изменяя сопротивление переменного резистора, получить значения тока, протекающего через светодиод, равные 1 мА, 2,5 мА, 5 мА, 10 мА, 15 мА, 20 мА, 25 мА. Измерить падение напряжения на светодиоде при данных значениях тока.
5. По полученным данным построить ВАХ светодиодов.
6. Подключить следующий светодиод с помощью переключателя SA и повторить п.4,5.

Содержание отчета:

1. Теоретические основы работы светодиодов.
2. Таблица численных результатов измерений.
3. Графики вольтамперных характеристик светодиодов.
4. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какие материалы используют для изготовления светодиодов?
2. Для чего неактивная область светодиода имеет более высокий уровень легирования по сравнению с активной областью?
3. Почему светодиод излучает немонахроматический свет?
4. Чем вызвано различие рабочего напряжения светодиодов, излучающих свет с разной длиной волны?
5. Почему при включении светодиода необходим ограничивающий резистор?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семенов, А.Б. Волоконно-оптические системы современных СКС [Текст] / А.Б.Семенов. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
2. Бутусов, М.М. Волоконная оптика и приборостроение [Текст] / М.М.Бутусов. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
3. Гуртов, В.А. Оптоэлектроника и волоконная оптика [Текст] / В.А.Гуртов. – Петрозаводск: изд-во ПетрГУ, 2005. – 100 с.
4. Ильин, В. Стратегические бомбардировщики и ракетоносцы зарубежных стран [Текст] / В.Ильин, И.Кудишин. – М.: АСТ, 2002. – 384 с.
5. Сайт программы DARPA [Электронный ресурс] : http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2011/2011/01/13_NEW-NIP_Program_Advances_Avionics_Networks.aspx
6. Афанасьев В.Н., Букреев В.Г. и др. Электроприводы промышленных роботов с адаптивным управлением. Томск: Изд. томского университета, 1987. – 164с.
7. Белов М.П., Новиков В.А, Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: АСАДЕМА, 2004. – 575 с.
8. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. – 264 с.
9. Ишанин, Г.Г. Источники и приемники излучения [Текст] / Г.Г.Ишанин и др. – СПб: Политехника, 1991. – 240 с.
10. Иванов, А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения [Текст] / М.: компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.
11. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. [Текст] / Р.Г.Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
12. Ермаков, О. Н. Прикладная оптоэлектроника [Текст] / О. Ермаков. - М. : Техносфера, 2004. - 414 с. - (Мир электроники). - ISBN 5-94836-023-7.
13. Розеншер, Э. Оптоэлектроника [Текст] : пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; под ред. О. Н. Ермакова. - [2-е испр. изд]. - М. : Техносфера, 2006. - 589 с. - (Мир электроники ; VII-04). - ISBN 5-94836-031-8.