

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»
(ФГБОУ ВО ЗабГУ)
Кафедра Физики и техники связи

Методические указания к лабораторным и практическим работам по дисциплине
«Проектирование оптоэлектронных приборов, устройств и систем»

Чита, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Правила выполнения работ и техники безопасности	5
Лабораторная работа №1. «Исследование прохождения света в различных средах»	9
Лабораторная работа №2. «Исследование характеристик фотоприемников»	16
Лабораторная работа №3. «Исследование характеристик светоизлучающих диодов»	21
Лабораторная работа №4. «Исследование характеристик электролюминесцентных излучателей»	25
Лабораторная работа №5. «Исследование характеристик оптронов»	32
Лабораторная работа №6. «Исследование характеристик солнечных фотопреобразователей»	37

ВВЕДЕНИЕ

Оптоэлектроника – направление электроники, охватывающее вопросы оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации. Это направление возникло как этап развития радиоэлектроники и вычислительной техники, тенденцией которых является непрерывное усложнение систем при возрастании их информационных и технико-экономических показателей (увеличение надежности, быстродействия, информационной емкости, уменьшение размеров и веса и др.). Оптоэлектроника отличается от вакуумной и полупроводниковой электроники наличием в цепи сигнала оптического звена или оптической (фотонной) связи. Достоинства оптоэлектроники определяются в первую очередь преимуществами оптической связи по сравнению с электрической, а также теми возможностями, которые открываются в результате использования разнообразных физических явлений, обусловленных взаимодействием световых полей с веществом. Основные элементы оптоэлектроники: источники света (лазеры, светодиоды и др.), оптические среды (активные и пассивные) и фотоприемники. Эти элементы применяются как в виде различных комбинаций, так и в виде автономных устройств и узлов с самостоятельными частными задачами.

В соответствии с местом дисциплины «Оптоэлектроника» в учебном плане инженеров по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и бакалавров по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств» цель лабораторных занятий заключается в изучении студентами физических процессов преобразования электрических и оптических сигналов, элементов и устройств, использующих эти преобразования, их конструкции, свойств и параметров, назначение и области применения.

Сборник лабораторных работ включает описание лабораторных работ по следующим разделам учебной программы: «Источники излучения», «Приемники излучения», «Индикаторы», «Оптроны». При выполнении работ изучаются физические эффекты и явления, используемые в оптоэлектронных приборах, свойства используемых материалов, конструкции устройств, их основные параметры и характеристики, особенности применения в электронных средствах.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Общие указания

1. При подготовке к работе ознакомиться с описанием лабораторной работы и установки (стенда), составить необходимые функциональные и принципиальные схемы, выяснить назначение отдельных элементов стенда и порядок включения, выполнить предусмотренные описанием предварительные расчеты, ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы.

2. Перед выполнением работы каждый студент обязан предоставить преподавателю заготовленную форму отчета, содержащего необходимые расчеты, таблицы, функциональные и принципиальные схемы, выполненные в соответствии с ЕСКД.

3. Выполнению работы предшествуют проверка готовности студента к работе. Проверка производится преподавателем в начале каждого занятия в следующем порядке:

- а) студент предъявляет все материалы, согласно п. 2;
- б) если предъявленные материалы найдены удовлетворительными, студент получает вопросы по теме предстоящей работы;
- в) при удовлетворительных ответах студент допускается к выполнению работы.

4. Студенты, допущенные к выполнению работы, прodelывают ее в соответствии с описанием. Работа считается законченной после утверждения полученных результатов преподавателем.

5. По окончании работы студент должен выключить все источники питания и приборы, отключить их от сети, разобрать схемы исследований на стенде и привести рабочее место в порядок.

6. Отчет по работе оформляется по установленному образцу. Студент получает зачет по работе после представления оформленного отчета и объяснения полученных результатов. Студент, не сдавший отчета по прodelанной работе, к последующей работе не допускается.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Описание явления и прибора, исследуемого в данной работе (основные свойства, параметры, характеристики, области применения).
2. Схема измерительной установки.
3. Краткое изложение сущности применяемого метода измерений.
4. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц и графиков, а также формулы с примерами расчетов.
5. Выводы по работе и критическая оценка полученных результатов, исходя из сопоставления их со справочными данными и лекционным материалом.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Самохвалов М.К., Элементы и устройства оптоэлектроники: Учебное пособие. – Ульяновск; УлГТУ, 2003 -126 с. <http://ofap.ulstu.ru/pites/Optoel.pdf>
2. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989. – 359 с.
3. Верещагин И. К., Косяченко Л. А., Кокин С. М. Введение в оптоэлектронику. – М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.

3. Мухин Ю. А. Приборы и устройства полупроводниковой оптоэлектроники. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 298 с.

5. Юшин А. М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги: Каталог-справочник. – М.: Радио-софт, т.1, 1998. – 511 с; т.2, 1999. – 544 с; т.3, 2000. -512 с.

ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Несчастные случаи во время проведения лабораторных работ могут происходить чаще всего из-за несоблюдения правил техники безопасности. Необходимо иметь в виду, что неаккуратность, невнимательность, незнание аппаратуры, спешка и недостаточная подготовка к работе могут повлечь за собой несчастный случай. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать самим и останавливать всех лиц, не выполняющих правила техники безопасности. Студенты, не выполняющие правила техники безопасности или допустившие их нарушение, отстраняются от выполнения работ и привлекаются к ответственности. Перед выполнением лабораторной работы в целях исключения несчастных случаев, а также поломки оборудования, каждый студент должен подробно ознакомиться с правилами техники безопасности.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- приступать к выполнению лабораторной работы без ознакомления с правилами по технике безопасности;
- включать установки без разрешения учебного мастера (преподавателя);
- касаться нагретых частей лабораторной установки.

СТУДЕНТ ОБЯЗАН:

- знать места расположения и размещения средств огнетушения и правила пользования ими;
- быть внимательным и аккуратным во время выполнения работы;
- не вмешиваться в работу студентов, выполняющих другую работу.

ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Перед началом работы:

- подготовить рабочее место для безопасной работы, убрать все лишние предметы с лабораторной установки;
- проверить целостность заземления установки и надежность контакта заземления.

После выполнения работы:

- по окончании работы или при длительном перерыве выключить установку полностью;
- сдать свое рабочее место чистым и в полном порядке;
- сообщить преподавателю или учебному мастеру обо всех ненормальностях во время работы установки.

ПРАВИЛА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ:

- не производить ремонт установки и ее блоков;
- не открывать защитных стенок установки, не прикасаться к клеммам и проводам;
- не производить замену плавких вставок и предохранителей;
- знать места расположения автоматов общего отключения и при необходимости отключить напряжение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Цель работы: Изучение пропускания оптического излучения различными материалами и причин потерь в объеме вещества и на границах раздела сред.

Общие сведения

Пропусканием в оптике называют прохождение сквозь среду оптического излучения без изменения набора частот составляющих его монохроматических компонентов. Различают: направленное пропускание, при котором рассеяние и поглощение света в среде отсутствует (пренебрежимо мало); диффузионное пропускание, при котором определяющим фактором является рассеяние, а преломление в среде и направленное пропускание не играют заметной роли; смешанное пропускание – частично направленное и частично диффузионное. Особый вид диффузионного пропускания – равномерно-диффузионное, при котором пространственное распределение рассеянного излучения таково, что яркость одинакова по всем направлениям.

Коэффициент пропускания среды T есть отношение потока излучения Φ , прошедшего через среду, к потоку Φ_0 , падающему на ее поверхность: $T = \Phi/\Phi_0$. Значение коэффициента пропускания объекта зависит как от его размера, формы и состояния поверхности, так и от угла падения, спектрального состава и поляризации излучения.

Прозрачностью среды называют отношение светового потока, прошедшего среду без изменения направления, к потоку, вошедшему в эту среду в виде параллельного пучка. Высокой прозрачностью обладают среды со значительным и в основном направленным пропусканием оптического излучения. В диапазоне видимого света сквозь тела из таких сред при подходящих их геометриче-

ских формах предметы видны отчетливо. Прозрачность отличают от пропускания вообще, так как среда может быть непрозрачна, но в то же время пропускать рассеянный свет (например, тонкие листы бумаги). Соответственно прозрачность связана только с коэффициентом направленного (но не диффузионного) пропускания. В слое толщиной 1 см прозрачность оптического кварца около 0,999; оптического стекла $\sim 0,99 - 0,995$. Причины, препятствующие прохождению света сквозь среду, обусловлены взаимодействием оптического излучения с веществом, происходящим чаще всего без изменения длины волны излучения: поглощением, рассеянием и отражением света.

Отражение света представляет собой явление, заключающееся в том, что при падении света из одной среды на границу ее раздела со второй средой взаимодействие света с веществом приводит к появлению световой волны, распространяющейся от границы раздела обратно в первую среду. Несамосветящиеся тела становятся видимыми вследствие ограничения света от их поверхностей. Для зеркального отражения интенсивность отраженного света зависит от угла падения и поляризации падающего пучка лучей и соотношения показателей преломления сред.

Рассеянием света называют изменение характеристик потока оптического излучения при его взаимодействии с веществом. Этими характеристиками могут быть пространственное распределение интенсивности, частотный спектр, поляризация света. Часто рассеянием света называют только обусловленное пространственной неоднородностью среды изменение свечения среды. Вследствие обилия и разнообразия факторов, определяющих рассеяние света (рассеяние Рэлея и Ми, молекулярное, комбинационное, томсоновское, вынужденное рассеяние, резонансная флуоресценция, опалесценция и др.) весьма трудно развить одновременно единый и детальный способ его описания для различных случаев. Поэтому обычно рассматривают идеализированные ситуации с различной степенью адекватностью самому явлению.

Поглощение света – уменьшение интенсивности оптического излучения, прошедшего через среду, за счет процессов его взаимодействия с веществом.

Световая энергия при поглощении света переходит в различные формы внутренней энергии сред; она может быть также частично переизлучена средой на частотах, отличных от частот поглощенного излучения.

Оптические среды, пропускающие оптическое излучение, являются необходимым элементом практически всех оптоэлектронных устройств, в том числе и отдельных источников и приемников излучения. Поэтому измерение коэффициентов пропускания и их спектральных зависимостей является одной из важнейших задач при выборе материалов и конструкций приборов. Особенно важное значение исследования пропускания света имеют при разработках светофильтров, волоконно-оптических линий, оптических транспарантов и др.

В данной работе исследование прохождения света в различных средах производится с помощью спектрофотометра СФ-26.

Методика выполнения работы

Спектрофотометр СФ-26 рассчитан для измерения коэффициента пропускания исследуемого образца T , равного отношению интенсивности потока излучения I , прошедшего через измеряемый образец, к интенсивности потока излучения I_0 , падающего на измеряемый образец или прошедшего через контрольный образец, коэффициент пропускания которого принимается за единицу и выражается формулой:

$$T = (I / I_0) 100\%.$$

Измерение производится по методу электрической автокомпенсации.

В монохроматический поток излучения поочередно вводятся контрольный и измеряемый образцы. При введении контрольного образца стрелка измерительного прибора устанавливается на делении «100» регулировкой ширины щели, и значение установившегося при этом светового потока принимают за 100% пропускания. При введении в поток излучения измеряемого образца стрелка измерительного прибора отклоняется пропорционально изменению по-

тока, величина коэффициента пропускания отсчитывается по шкале в процентах пропускания.

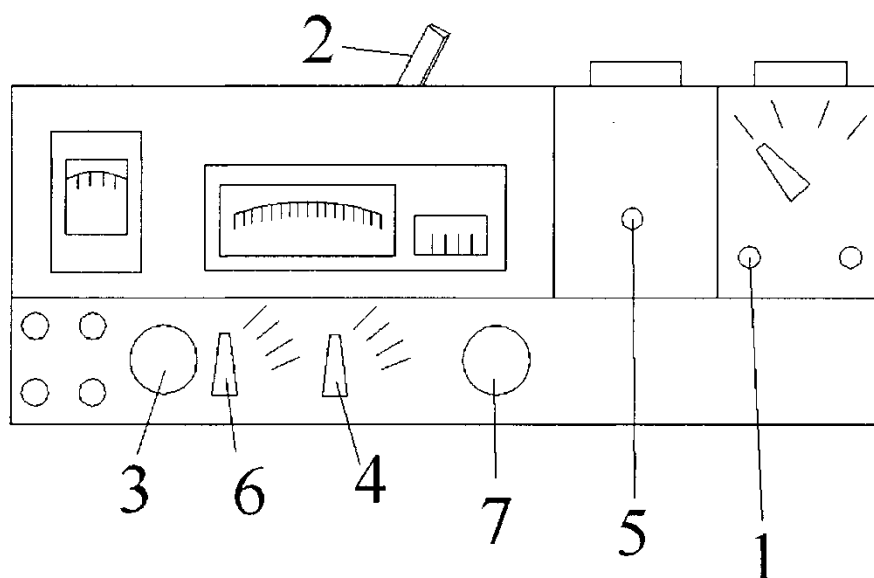


Рис. 1. Спектрофотометр СФ-26.

1- переключение положения шторки; 2- диапазон излучения; 3- установка длины волны излучения; 4- установка множителя шкалы измерений; 5- перемещение образца; 6- компенсация показаний шкалы; 7- установка ширины щели.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка к работе.

1.1. Установите в рабочее положение фотоэлемент и источник излучения, соответствующие выбранному спектральному диапазону измерений.

1.2. Закройте фотоэлемент, поставив рукоятку (см. рис. 1) шторки в положение ЗАКР.

1.3. Включите тумблер СЕТЬ, после чего должны загореться сигнальная лампа Д или Н в соответствии с выбранным источником излучения.

1.4. Стабильная работа спектрофотометра обеспечивается через 0,2 – 1 час после включения.

1.5. Для включения после лампы накаливания дейтериевой лампы переключите конденсатор рукояткой 2 (см. рис. 1); после минутного прогрева лампы автоматически загорается, одновременно загорается и соответствующая индикаторная лампа на передней панели.

1.6. Выключение спектрофотометра производите тумблером СЕТЬ.

1.7. Получить у преподавателя задание по работе: исследуемый образец и диапазон длин волн.

2. Подготовка к измерению.

(Внимание: Измерение коэффициентов пропускания производится при плотно закрытой крышке кюветного отделения!)

2.1. Установите рукоятку КОМПЕНСАЦИЯ в положение «0».

2.2. Установите требуемую длину волны, вращая рукоятку 3 в сторону увеличения длин волн. Если при этом шкала повернется на большую величину, то возвратите ее назад на 3-5 нм и снова подведите к требуемому делению.

2.3. Установите рукоятку ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ в положение «1» (рабочее положение). Если поток излучения недостаточен и измеряемый и контрольный образцы значительно поглощают излучение, установите рукоятку в положение «2», «3» или «4». При работе в положениях КАЛИБР и «х0,01» рукоятки 4 рукоятку ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ установите также в одно из положений «2», «3», «4».

3. Измерение коэффициента пропускания.

3.1. Установите на пути потока излучения контрольный образец, перемещая каретку рукояткой 5.

При отсутствии контрольного образца за 100% пропускания принимается значение светового потока, проходящего через свободное окно держателя фильтров.

3.2. Установите рукоятку 6 в положение «х1».

3.3. Установите рукояткой НУЛЬ стрелку измерительного прибора на ноль.

3.4. Откройте фотоэлемент, установив рукоятку 1 шторки в положение ОТКР.

3.5. Установите стрелку измерительного прибора на деление «100», вращая рукоятку 7 механизма изменения ширины щели.

3.6. Установите в рабочее положение измеряемый образец, перемещая каретку рукояткой 7, и снимите отсчет по шкале пропускания T .

3.7. Выделите из потока излучения измеряемый образец и введите контрольный образец, при этом стрелка измерительного прибора должна вернуться на деление «100».

3.8. Повторить измерения для других заданных длин волн. Результаты измерений занести в таблицу (λ, T) .

4. Учет потерь на отражение от поверхности исследуемого образца или кюветы.

4.1. Если при измерении коэффициента пропускания материала образца необходимо учитывать потери на отражение от обеих его поверхностей или от поверхностей кюветы, то это делают по формуле

$$T_{\lambda} = \frac{T'_{\lambda}}{(1-r)^2},$$

где T'_{λ} - коэффициент пропускания исследуемого образца для данной длины волны, измеренной на спектрофотометре;

r – коэффициент отражения поверхности образца или кюветы при перпендикулярном падении света.

Значение r определяется по формуле Френеля

$$r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

где n – показатель преломления материала образца или кюветы для $\lambda = 589,9$ нм (n_D).

4.2. Если требуется более высокая точность измерений пропускания вещества в кювете, то следует учитывать разность пропускания кювет.

5. Оформление результатов измерений

5.1. Результаты измерений коэффициента пропускания оформить в виде таблицы, в которой каждому значению длины волны излучения соответствует полученное значение коэффициента пропускания.

5.2. При необходимости произвести учет потерь на отражение и дополнит таблицу измерений рассчитанными значениями коэффициента пропускания с учетом потерь на отражение.

5.3. Построить графики зависимости коэффициента пропускания от длины волны в заданном диапазоне для исследованного образца без учета и с учетом потерь на отражение.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Направленное и диффузионное пропускание света веществом.
2. Поглощение света в веществе. Закон Бугера – Ламберта. Влияние агрегатного состояния вещества на коэффициент поглощения.
3. Рассеяние света в веществе. Мутные среды. Виды рассеяния. Рэлеевское и молекулярное рассеяние.
4. Отражение света от границы прозрачных диэлектриков. Формулы Френеля, полное внутреннее отражение.
5. Привести примеры пассивных и активных оптических сред, применяемых в оптоэлектронных устройствах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНИКОВ

Цель работы: Изучение воздействия оптического излучения и параметров приборов для обнаружения и регистрации излучения.

Общие сведения

Фотоприемник, или более широко – приемник оптического излучения, представляет собой прибор, в котором под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить это излучение и измерить его характеристики.

Энергию электромагнитного излучения, облучающегося приемный элемент, можно разделить на отраженную, поглощенную и проходящую через материал. Для фотоприемников, преобразующих энергию электромагнитного излучения в электрическую, желательно, чтобы в объеме материала поглощалась возможно большая часть падающего излучения. Наиболее распространенными являются фотоприемники на основе полупроводниковых материалов.

Поглощаемые полупроводником кванты излучения освобождают носители заряда любого из атомов решетки, либо из атомов примеси. Если энергия, которую фотон сообщает электрону, достаточна для того, чтобы электрон покинул пределы вещества, мы имеем дело с внешним фотоэффектом. Если в результате взаимодействия фотона с атомом освобождаются носители заряда, перемещающиеся в электрическом поле, мы имеем дело с внутренним фотоэффектом. В полупроводниках внутренний фотоэффект проявляется в виде увеличения их удельной проводимости во время облучения (фотопроводимости).

Фотоприемники с внутренним фотоэффектом чувствительны в любой области спектра, они могут иметь и селективную спектральную характеристику. Такие фотоприемники, используемые в некогерентных оптоэлектронных сис-

темах прямого детектирования, получили широкое распространение благодаря их универсальности, простоте реализации, схемной минимизации, возможности микроминиатюризации и интеграции, что позволяет также создавать на их основе многоэлементные (мозаичные) структуры. Технология их типична для технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Основные этапы оптоэлектронного преобразования включают в себя следующие эффекты: поглощение энергии излучения, генерация носителей, внутреннее усиление и формирования выходного сигнала. Последний определяет условия согласования фотоприемника с нагрузкой, включая входные цепи усилителей для случая внешнего усиления сигнала фотоответа.

Внутренний фотоэффект позволяет создавать фотоприемники с большим внутренним усилением фототока (фоторезисторы, лавинные фотодиоды), реализовывать большое быстродействие (pin-диоды, диоды Шоттки), сопрягать с фотодетектором усилительные и ключевые элементы (фототранзисторы, фототиристоры и др.).

К фотоприемникам как преобразователям оптических сигналов в оптоэлектронике предъявляют следующие требования:

1. Спектральное распределение fotocувствительности, соответствующее спектральной характеристике источника излучения.

2. Высокая fotocувствительность, определяющая минимальный уровень входного сигнала при заданном уровне выходного.

3. Низкий уровень шумов в заданной полосе частот и заданном коэффициенте усиления, что определяет низкий порог чувствительности и высокую обнаружительную способность.

4. Заданные электрические параметры: сопротивление, емкость, напряжение и ток, определяющие согласование фотоприемника с нагрузкой.

5. Широкая полоса пропускания и большой динамический диапазон как по оптическому входу, так и по электрическому выходу, что обуславливает большое быстродействие и возможности аналогового преобразования.

Методика выполнения работы

Фотоприемник как преобразователь энергии излучения является важнейшим элементом любого оптоэлектронного изделия. Именно он осуществляет связь между оптической и электрической частями прибора. Именно фотоприемник выбирают исходя из требований ко всему оптоэлектронному изделию, т. е. в основе конструирования оптопары, оптоэлектронной микросхемы лежит выбор приемника излучения. Поэтому система его параметров должна строиться на принципах электроннооптического преобразования и обеспечивать наилучшее согласование в технологическом цикле излучателя и фотоприемника, а также достижение заданных параметров изделия в целом.

Свойства приемников излучения наиболее полно могут быть описаны системой характеристик выражающих зависимость величины сигнала и шума на выходе фотоприемника от различных факторов: величины, спектрального состава и частоты модуляции возбуждающего излучения, температуры окружающей среды, напряжения питания, наличия фоновых сигналов и др.

Основными характеристиками фотоприемников являются:

- энергетическая или световая, определяющая зависимость величины фототока или фотонапряжения от освещенности;
- спектральная, выражающая зависимость выходного сигнала от длины волны возбуждающего излучения при его постоянном уровне;
- зависимость выходного сигнала от частоты модуляции потока излучения;
- вольт-амперная – зависимость общего тока через приемник (фототока и темнового тока) от величины приложенных напряжений;
- характеристика управления фотоприемника, например зависимость напряжения включения фототиристора от управляющего светового излучателя.

В ряде случаев проектирования оптоэлектронных устройств достаточно вместо перечисленных характеристик иметь набор (систему) параметров, выражающих свойства фотоприемника при определенных питающих напряжениях и режимах эксплуатации.

Порядок выполнения работы

Для проведения исследований используется лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 2.

В данной работе исследуются характеристики фоторезистора ФСК-1Г, фотодиода ФД-2 и фототранзистора ФТГ-3. В качестве источника света используется лампа накаливания, яркость свечения регулируется резистором R_0 . Освещенность, создаваемая источником света, измеряется с помощью люксметра.

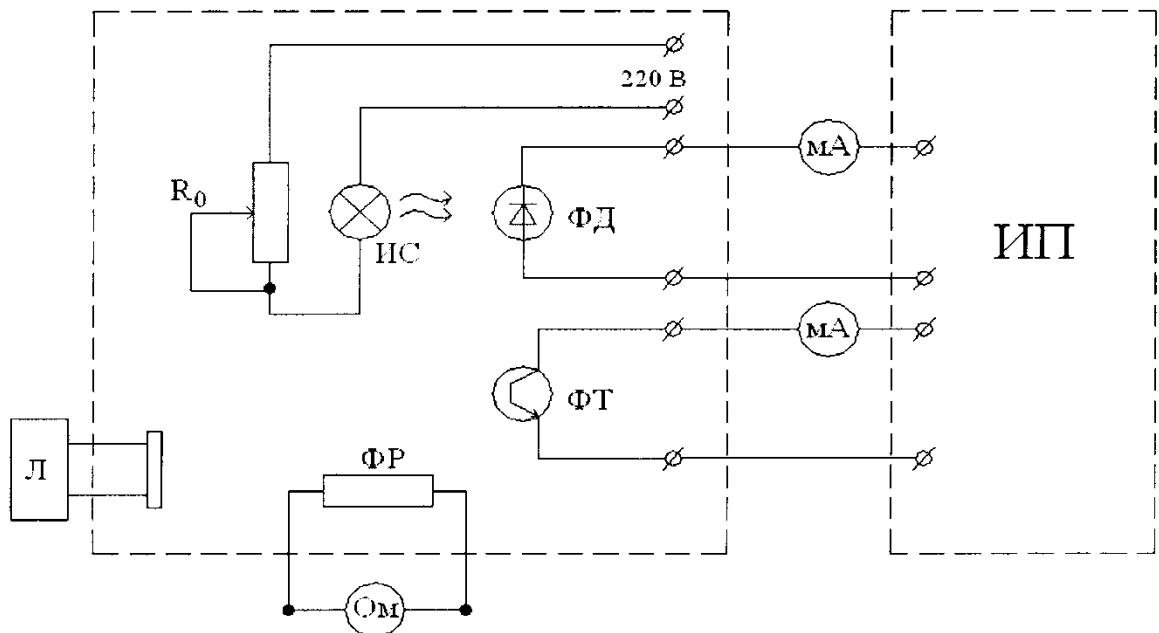


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: ИП – источник питания, ИС – источник света (лампочка накаливания), R_0 – резистор, регулирующий яркость свечения, ФР – фоторезистор, ФД – фотодиод, ФТ – фототранзистор, Ом – омметр, мА – миллиамперметр, Л – люксметр.

1. Изучение свойств фоторезистора.

1.1. Измерить омметром темновое сопротивление фоторезистора. Переключатель режимов измерения поставить в положение « R_x », переключатель режимов работы – в положение « $R = f(E)$ фоторезистора».

1.2. Увеличивая яркость свечения, измерить зависимость сопротивления фоторезистора от освещения.

1.3. Построить график зависимости отношения темнового сопротивления к световому от освещенности.

2. Изучение свойств фотодиода.

2.1. Переключатель режимов измерения поставить в положение «-», переключатель диапазонов измерения – в положение «30 В», переключатель режимов работы – в положение «Установка напряжения на фотодиоде». Установить значение напряжения на фотодиоде в диапазоне 8...15 В.

2.2. Измерить миллиамперметром темновой ток. Для этого поставить переключатель диапазонов измерения – в положение «0,3 мА», переключатель режимов работы – в положение « $I = f(E)$ фотодиода».

2.3. Увеличивая яркость свечения, измерить зависимость тока через фотодиод от освещенности. Построить график зависимости тока от освещенности.

3. Изучение свойств фототранзистора.

3.1. Переключатель режимов измерения поставить в положение «-», переключатель диапазонов измерения – в положение «30 В», переключатель режимов работы – в положение «Установка напряжения на фототранзисторе». Установить значение выходного напряжения фототранзистора в диапазоне 8...15 В.

3.2. Измерить значение выходного темнового тока. Переключатель диапазонов измерения – в положение «0,3 мА» или «3 мА», переключатель режимов работы – в положение « $I = f(E)$ фототранзистора». Увеличивая яркость свечения, измерить зависимость выходного тока от освещенности.

3.3. Построить график зависимости выходного тока от освещенности.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Явление внутреннего фотоэффекта. Виды фотоприемников.
2. Основные характеристики и области применения фотоприемников.
3. Основные параметры фоторезисторов и методы их определения.
4. Основные типы и параметры фотодиодов.
5. Основные параметры фототранзисторов и методы их определения.
6. Фототиристоры и другие многопереходные фотоприемники.
7. Применение фотоприемников.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Цель работы: Изучение явления генерации света в полупроводниках и характеристик светодиодов.

Общие сведения

Светоизлучающим диодом называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. При протекании через диод прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда в базовую область диодной структуры. Процесс самопроизвольной рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда, происходящий как в базовой области, так и в самом p-n переходе, сопровождается их переходом с высокого энергетического уровня на более низкий; при этом избыточная энергия выделяется путем излучения кванта света. Длина волны излучения λ связана с изменением энергии электрона ΔE соотношением: $\lambda = hc/\Delta E$, где h – постоянная Планка; c – скорость света.

Диапазон длин волн видимого глазом света составляет 0,45 – 0,68 мкм, а ΔE почти равно ширине запрещенной зоны E_g полупроводника, на основе которого изготовлен светоизлучающий диод. Чтобы фотоны, образовавшиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ($E_g > 1,8$ эВ). Исходя из этого ограничения для изготовления светоизлучающих диодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC), твердые растворы (GaAsP, AlGaAs), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны

($E_g = 3,4 \text{ эВ}$), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового. Добавлением в полупроводниковый материал активаторов можно изменять в некоторых пределах цвет излучения диода.

По конструктивному признаку выпускаемые светодиоды подразделяются на приборы в металлических корпусах со стеклянной линзой (обладают весьма острой направленностью излучения), в пластмассовых корпусах из оптически прозрачного, чаще цветного компаунда, создающего рассеянное излучение; и бескорпусные, во избежание механических повреждений и загрязнения поверхности поставляемые в специальной таре-спутнике (при монтаже их приклеивают).

Светоизлучающие диоды в основном применяются как элементы индикации включения, готовности аппаратуры к работе, наличия напряжения питания в блоке, аварийной ситуации и других состояний. Дискретные светодиоды в пластмассовых корпусах применяются так же для набора матриц и линейных шкал, служащих средствами отображения крупноразмерной цифровой и линейно изменяющейся информации.

Методика выполнения работы

Основными параметрами промышленных светоизлучающих диодов являются:

1. Сила света I_v - излучаемый диодом световой поток на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Указывается при заданном значении прямого тока и измеряется в канделах.

2. Яркость B – величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности. Измеряется в канделах на квадратный метр при заданном значении прямого тока через диод.

3. Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ - значение напряжения на светодиоде при протекании прямого тока.

4. Максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{\text{ПРМАХ}}$ - максимальное значение постоянного прямого тока, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода.

5. Максимальное допустимое обратное постоянное напряжение $U_{\text{ОБРМАХ}}$ - максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к диоду, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе.

6. Максимальное допустимое обратное импульсное напряжение $U_{\text{ОБР.И.МАХ}}$ - максимальное пиковое значение обратного напряжения на светодиоде, включая как однократные выбросы, так и периодически повторяющиеся.

7. Максимум спектрального распределения $\lambda_{\text{МАХ}}$ - длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения.

Характеристикой диода как источника света является зависимость яркости от прямого тока, т.е. $V = f(I_{\text{ПР}})$ - яркостная характеристика, или зависимость силы тока от прямого тока, $I = f(I_{\text{ПР}})$ - световая характеристика. Излучение диода так же характеризуется диаграммой направленности, которая определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала.

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторный стенд по схеме, представленной на рис. 3.

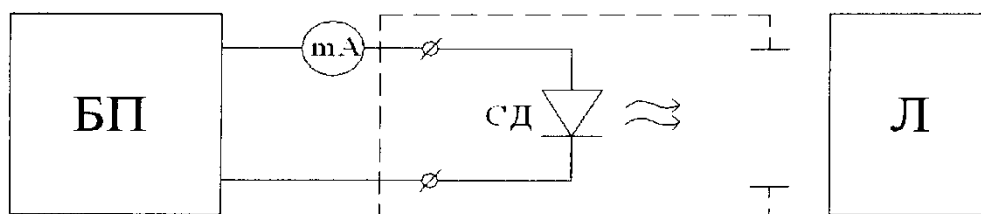


Рис. 3. Схема измерительной установки
БП – источник питания (Б5-49), СД – светодиод, Л – люксметр

2. Произвести измерения зависимости освещенности E площадки люксметра от тока I через светодиод красного цвета свечения до максимального значения $I = 20$ мА. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

I , мА	E , лк	I_v , мкд

3. Рассчитать значение силы света светодиода по формуле: $I_v = E \cdot S / \pi$, где S – площадь приемной площадки люксметра. Рассчитанные значения занести в таблицу 1.

4. Повторить измерения для светодиода зеленого цвета свечения.

5. Построить графики зависимости силы света светодиодов от рабочего тока (световые характеристики).

Вопросы для самостоятельной работы

1. Электролюминесценция в p-n переходах. Внутренний квантовый выход.
2. Зависимость генерируемого светодиодом светового потока от приложенного напряжения и температуры.
3. Спектральные характеристики и быстродействие светодиодов.
4. Потери на поглощение и отражение в инжекционных излучающих диодах.
5. Материалы и конструкции инжекционных излучающих диодов.
6. Применение инжекционных излучающих диодов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Цель работы: Исследование процессов преобразования электрической энергии в световое излучение и характеристик электролюминесцентных излучателей.

Общие сведения

Люминесценцией называется излучение, избыточное над тепловым при данной температуре и продолжающееся после прекращения возбуждения в течение времени, превышающего период световой волны ($> 10^{-14}$ с). Обычно эта задержка реакции люминесцирующего вещества (люминофора) на прекращение возбуждения значительно больше и является характерной для люминесценции, отражая процессы преобразования энергии в люминофоре.

Электролюминесценция представляет собой один из видов люминесценции, возникающей при электрическом возбуждении, когда происходит непосредственное преобразование энергии электрического поля в излучение. Электролюминесценция газообразных веществ (свечение газового разряда) известна давно и находит широкое применение в газоразрядных источниках света. К настоящему времени электролюминесценция наблюдалась у многих полупроводниковых веществ, у некоторых диэлектриков и ряда органических материалов. Различают в основном два вида электролюминесценции: инжекционную, возникающую, в частности, в р-п переходах при инжекции неосновных носителей, и предпробойную, т.е. возникающую в сильных полях, близких к тем, при которых происходит электрический пробой. Инжекционная люминесценция имеет место в разного рода излучающих диодах. Предпробойная люминесценция

используется в электролюминесцентных устройствах на основе порошковых и тонкопленочных люминофоров, возбуждаемых постоянным и переменным напряжением. Наиболее распространено возбуждение переменным напряжением пленочных излучателей, в которых люминофор изолирован от электродов, поэтому такие приборы получили название электролюминесцентных конденсаторов.

Порошковый светоизлучающий элемент представляет собой многослойную структуру на прозрачном основании: стеклянной пластине или полимерной пленке. Люминесцентный слой состоит из порошкообразного люминофора с органическим или неорганическим связующим. Толщина слоя составляет 300-100 мкм, содержание связующего 30-50%, размер зерен порошка 1-10 мкм. В основном в качестве люминофоров используется сульфид цинка и кадмия и сульфоселенидные соединения, а также сульфиды кальция и стронция. В качестве активаторов применяют медь, марганец, серебро, свинец и другие вещества, которые вводятся в люминофоры в количестве от единиц до сотых долей процента. Цвет свечения люминофора определяется типом и количеством вводимой примеси, легирование медью приводит к увеличению яркости излучения и повышению эффективности электролюминесценции. В качестве связующего используются диэлектрические лаки на основе эпоксидных смол, цианэтилцеллюлозы, цианэтилового эфира поливинилового спирта и др., а также стеклоэмалевое связующее. Светотехнические характеристики излучателей зависят от конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. К конструктивно-технологическим относят тип люминофора, размер зерен порошка, тип связующего, толщину и содержание люминесцентного слоя. К эксплуатационным факторам относят амплитуду и частоту возбуждающего напряжения, температуру, влажность среды и др. Обычно возбуждение электролюминесценции в порошковых излучателях производится напряжением 50-300 В частотой 50-5000 Гц. Яркость излучения панелей составляет от 5 до 150 кд/м³. Отечественной промышленностью выпускаются электролюминесцентные индикаторы

типа ИТЭЛ, ИЭМ, МЭЛ и др., используемые в качестве источников света, цифровых индикаторов, мнемонических и графических малоформатных экранов.

К недостаткам порошковых электролюминесцентных индикаторов относят ограниченные значения яркости и небольшой срок службы, который во многом обусловлен диффузией меди и других примесей. Несмотря на обширные исследования деградационных явлений в порошковых структурах долговечность приборов не превышает 2-3 тысяч часов.

Исследование тонкопленочных источников излучения были начаты несколько позже, чем порошковых люминофоров. Успехи в технологии получения тонких пленок, а также разработка структур, в которых слой люминофора расположен между двумя более тонкими слоями диэлектрика, позволили создать в 1974 году излучатели, которые имеют более высокую скорость и срок службы по сравнению с порошковыми. Типы и конструкции тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов различаются составом и пространственным расположением пленок, конфигурацией и взаимном расположением электродов, обусловленных требованиями к назначению и функциональным характеристикам индикаторных устройств. Наиболее типичная конструкция электролюминесцентных конденсаторов содержит пять слоев, нанесенных на диэлектрическую (в основном стеклянную) подложку: проводящий, диэлектрический, люминесцентный, диэлектрический, проводящий. Общая толщина структуры составляет 1-2 мкм. В качестве люминофоров используют сульфиды цинка, кальция или стронция, легированные марганцем или фторидами редкоземельных элементов для получения излучения различных цветов свечения с максимальной яркостью до $10^3 - 10^4$ кд/м². В качестве диэлектриков применяют пленкообразующие материалы с достаточно большой диэлектрической проницаемостью и электрической прочностью. Хотя бы один из электродов должен быть прозрачным (оксиды олова и индия). Слои наносятся методами тонкопленочной технологии: вакуумным или ионно-плазменным напылением, химическим осаждением.

Сущность явления электролюминесценции в тонких пленках не отличается принципиально от аналогичного эффекта в порошковых люминофорах, но по сравнению с порошковыми излучателями изолированные пленки люминофора обладают следующими особенностями. Из-за малой толщины пленок не требуется специальных мер для концентрации поля в узких слоях люминофора, поэтому одна из функций меди – создание в кристаллах люминесцентных материалов барьерных областей толщиной около 0,1 мкм – отпадает. Соответственно исчезают и процессы старения, связанные с диффузией меди, срок службы тонкопленочных индикаторов может превышать 20000 часов. Эффективность электролюминесценции не превышает нескольких процентов, но яркость может быть очень высокой благодаря использованию сильных электрических полей, значительных токов и более высокую разрешающую способность, устойчивость к тепловым и радиационным воздействиям, пространственную однородность изображения, легкость получения полутонов, большой угол обзора, что делает их перспективными для воспроизведения цветного телевизионного изображения.

Методика выполнения работы

Наиболее важными техническими характеристиками электролюминесцентных источников излучения являются: яркость и спектр излучения, рабочее напряжение, потребляемая мощность, световая отдача, долговечность, время нарастания и спада яркости и др. Величины характеристических параметров и их зависимость от управляющих воздействий и внешних факторов определяют применение излучателей в различных индикаторных устройствах.

Основной характеристикой электролюминесцентных источников света является зависимость яркости излучения от приложенного напряжения (вольт-яркостная характеристика). Принято изображать графики вольт-яркостных характеристик в полулогарифмическом масштабе, т. е. по оси абсцисс напряжение обозначают в линейном масштабе, а по оси ординат показывают яркость в

логарифмических координатах. Использование логарифмического масштаба для яркости излучения связано с субъективностью восприятия ее величины органами зрения человека, увеличение яркости источника света на порядок человек воспринимает как увеличение в два раза. Вольт-яркостная характеристика тонкопленочных излучателей имеет пороговый характер, рост яркости происходит, когда напряжение превышает некоторое значение. Величина порогового напряжения определяется свойствами материала люминофора, величиной и соотношением емкостей люминесцентного и диэлектрического слоев. Принято определять значение порогового напряжения по определенному уровню яркости (1 или 10 кд/м²). Однако зависимость яркости от условий возбуждения, поэтому определяемая таким образом величина порогового напряжения применима для оценки светотехнических свойств. Для анализа электрических характеристик более корректным является определение порогового напряжения с помощью измерений заряда или мощности. Величина порогового напряжения определяет минимальное рабочее напряжение тонкопленочных светоизлучающих приборов. Значение максимальной яркости тонкопленочных электролюминесцентных излучателей зависит как от свойств люминофоров и конструктивных параметров светоизлучающей структуры, так и от условий возбуждения. С увеличением амплитуды напряжения для вольт-яркостных характеристик наблюдается насыщение яркости. С ростом частоты возбуждающего напряжения насыщение происходит при меньших его значениях и величина максимальной яркости возрастает.

Кинетические характеристики излучения определяются скоростями возбуждения и спада люминесценции. Время нарастания свечения обуславливается скоростью возбуждения активаторов, которая зависит от плотности тока и напряженности и составляет от 1 до 20 мкс. Длительность спада излучения определяется скоростью релаксации активаторов из возбужденного состояния, которое зависит от типа активатора, его концентрации, наличия других примесей и структурных дефектов. При относительно малых концентрациях примеси

спад носит экспоненциальный характер, постоянная времени для разных активаторов имеет значение от 50 мкс до 1,3 мкс.

Эффективность процессов преобразования электрической энергии в излучение характеризуется коэффициентом светоотдачи электролюминесцентного излучателя, определяемого как отношение светового потока к потребляемой мощности. Величина светоотдачи зависит от состава и толщины пленки люминофора, параметрических слоев, амплитуды, частоты и формы возбуждающего напряжения. Основной задачей при разработке электролюминесцентных излучателей является повышение светоотдачи.

Порядок выполнения работы

1. Собрать измерительный стенд по схеме, представленной на рис. 4.

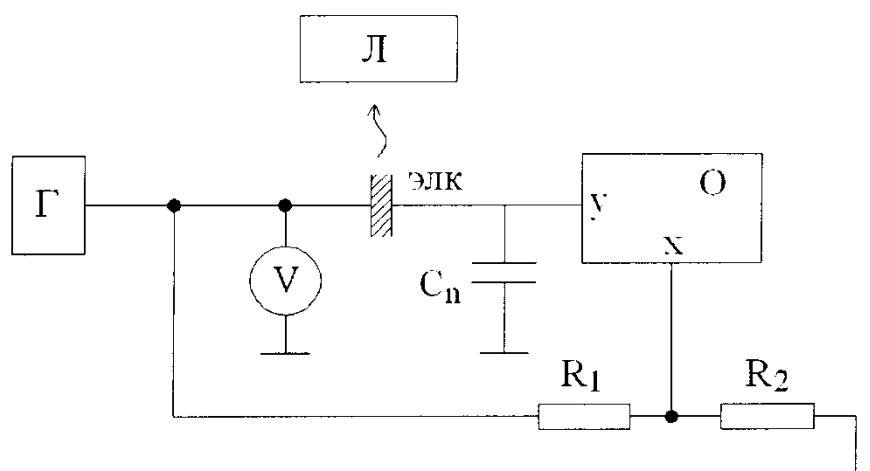


Рис. 4. Схема измерительной установки:

Г – генератор, V – вольтметр, R_1 и R_2 - делитель напряжения, C_n - измерительный конденсатор, ЭЛК – электролюминесцентный конденсатор, Л – люксметр, О – осциллограф.

2. Для нескольких указанных преподавателем фиксированных значений частоты f измерить зависимость освещенности E на люксметре от приложенного напряжения V . Зарисовать на кальку петли гистерезиса на экране осциллографа. Рассчитать площадь петли гистерезиса. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2.

f, кГц	V, В	E, лк	S, см ²	B, кд/м ²	lg B	P, Вт	Φ, лм	η, м/Вт

3. Рассчитать значение яркости свечения $B = E/\pi$ и светового потока $\Phi = 2E \cdot S_{л}$, где $S_{л}$ - площадь приемной площадки люксметра.

4. Рассчитать значение потребляемой мощности электролюминесцентным конденсатором: $P = S \cdot m_x \cdot m_y \cdot C_u \cdot f$ (Вт), где S – площадь петли гистерезиса (см²), m_x и m_y - масштаб по осям x и y осциллографа (В/см), C_u - емкость измерительного конденсатора (Ф), f – частота (Гц).

5. Вычислить значения светотдачи электролюминесцентного конденсатора для различных значений частоты и напряжения $\eta = \Phi/P$ лм/Вт.

6. Построить графики зависимости $\lg B(V)$, $\eta(V)$ и $\eta(B)$.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое люминесценция? Виды люминесценции.
2. Инжекционная и предпробойная электролюминесценция.
3. Фотометрические и энергетические величины, характеризующие световое излучение, их взаимосвязь.
4. Порошковые и тонкопленочные электролюминесцентные конденсаторы. Основные параметры и области применения приборов.
5. Светотехнические характеристики электролюминесцентных источников излучения и способы их измерения.
6. Применение электролюминесцентных конденсаторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТРОНОВ

Цель работы: Изучение преобразования информации и энергии в различных оптопарах.

Общие сведения

Оптрон – это прибор, содержащий источник и приемник излучения, которые оптически и конструктивно связаны. Источниками света могут служить лампы накаливания, неоновые лампы, электролюминесцентные излучатели, однако в большинстве случаев ими являются излучающие диоды. В качестве приемника излучения используют фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. Средой оптического канала, связывающего излучатель и приемник, могут служить воздух, стекло, пластмасса и другие прозрачные вещества. Элементарный оптрон, содержащий один источник и один приемник излучения, называют также оптопарой. Будучи объединенными в микросхему вместе с одним или несколькими согласующими или усиливающими устройствами, оптопары образуют оптоэлектронную интегральную микросхему.

В оптронах происходит двойное преобразование энергии. Входной электрический сигнал (характеризующийся силой тока или напряжением) преобразуется источником излучения в световой, который передается затем по оптическому каналу к фотоприемнику. Фотоприемник осуществляет обратное превращение светового сигнала в электрический. Среда оптического канала может быть управляемой (например, обладать электрооптическими свойствами). Для согласования параметров оптронов с другими элементами электронных схем могут использоваться дополнительные входные и выходные устройства.

Оптроны, в которых фотоприемник и излучатель электрически не соединены, могут использоваться для гальванической развязки цепи. Однако введе-

ние электрической, а также оптической обратной связи между компонентами оптрона способно существенно расширить его возможности. В этом случае он может быть использован как прибор, позволяющий генерировать и усиливать электрические и оптические сигналы, как запоминающее устройство и т. д. Кроме того, оптрон характеризуется следующими достоинствами: - высокой помехозащищенностью (поскольку его оптический канал невосприимчив воздействию посторонних электромагнитных полей), а также однонаправленностью передачи оптического сигнала; - широкой частотной полосой пропускания и, в частности, способностью преобразовывать и передавать не только импульсные сигналы, но и постоянную составляющую; - совместимостью с другими изделиями полупроводниковой микроэлектроники.

Среди недостатков, присущих современным оптронам, необходимо прежде всего отметить их низкий КПД, что связано с большими потерями энергии при преобразовании электрического сигнала в оптический и обратно. Так же, как и у других полупроводниковых приборов, параметры оптрона чувствительны к изменению температуры. От температуры, в частности, сильно зависит срок службы таких устройств, который и так во многих случаях оказывается недостаточно высоким даже при комнатной температуре. К недостаткам нужно отнести также относительно высокий уровень собственных шумов и определенное конструкторско-технологическое несовершенство современных оптронов. Выпускаемые приборы изготавливают на гибридной технологии, при этом в одном устройстве необходимо довольно точно совмещать разнородные элементы – излучатель и фотоприемник. Перечисленные недостатки ограничивают область применения оптронов, однако, по мере совершенствования материалов и технологии, решения ряда схемотехнических задач эти недостатки проявляются все в меньшей степени.

Конструктивно оптроны выполняются в корпусах как дискретные полупроводниковые приборы и микросхемы. Элементы оптронов разнородны по спектральным характеристикам, электрическим параметрам (уровни токов и напряжений), технологии изготовления, допустимым условиям эксплуатации.

Поэтому при конструировании оптронов необходимо согласование его элементов по параметрам подбором составляющих в паре и (или) схемным решением.

Методика выполнения работы

Элементарный оптрон является четырехполюсным прибором, свойства которого определяются прежде всего тремя основными характеристиками – входной, передаточной и выходной. Входной является вольт-амперная характеристика излучателя, выходной – соответствующая характеристика фотоприемника (при заданном токе на входе оптопары). Передаточной характеристикой называют зависимость тока I_2 на выходе оптрона от тока I_1 на его входе; в общем случае эта зависимость является нелинейной, что приводит к некоторому искажению формы передаваемого сигнала. Параметром, тесно связанным с зависимостью $I_2(I_1)$ и часто используемым на практике, является коэффициент передачи по току (статический) $K_1 = I_2/I_1$. В общем случае, особенно при высоких температурах, когда существенен темновой ток I_T на выходе фотоприемника, $K_1 = (I_2 - I_T)/I_1$. Для большинства типов оптопар K_1 является паспортным параметром, причем он может составлять от 0,5% (диодные пары) до ~ 1000% (транзисторные оптопары с составным фоторезистором). Для тиристорных оптопар, которые работают в ключевом режиме, коэффициент передачи по току не используется в качестве параметра.

Суммарное быстродействие оптопары часто характеризуют временем переключения, равным сумме времени нарастания и спада сигнала на выходе оптрона. Время переключения неодинаково у разных типов оптопар, оно зависит также от режимов их работы и может составлять от 10^{-9} до 10^{-1} с. Помимо времени переключения, быстродействие некоторых классов оптронов может быть задано граничной частотой $f_{гр}$. В зависимости от типа оптрона $f_{гр} = 5\text{кГц} \div 10\text{МГц}$.

Важным для характеристики оптопары являются параметры ее изоляции. Среди этих параметров – максимально допустимое напряжение между входом и выходом, сопротивление изоляции и проходная емкость (емкость между входом и выходом оптопары).

Конструктивно-технологическое оформление оптронов производится с учетом оптимизации функциональных, стоимостных и других параметров. Основным требованием является обеспечение эффективной оптической связи и электрической изоляции между источником и приемником.

Порядок выполнения работы

1. Измерение зависимости коэффициента передачи тока при изменении входного тока для диодной оптопары АОД101Б.
 - 1.1. Установить переключатель в положение «АОД».
 - 1.2. Установить максимальный ток на входе $I_{ВХ}$ оптопары резистора регулятором тока, снять показания выходного тока оптопары $I_{ВЫХ}$.
 - 1.3. Установить значение $J_{ВХ} = 0$. Изменяя входной ток с интервалом 1 мА, снять показания выходного тока оптопары.
 - 1.4. Вычислить коэффициент передачи по току по формуле $K_1 = I_{ВЫХ} / I_{ВХ}$.
 - 1.5. Построить график зависимости $J_{ВЫХ}$ от $J_{ВХ}$.

2. Измерение зависимости выходного тока от входного тока для транзисторной оптопары АОТ123Г.
 - 2.1. Установить переключатель в положение «АОТ».
 - 2.2. Установить значение входного тока $I_{ВХ} = 0$ регулятором $J_{ВХ}$. Изменяя входной ток с интервалом 1 мА измерить значение входного тока $J_{ВЫХ}$.
 - 2.3. Вычислить коэффициент передачи по току.
 - 2.4. Построить график зависимости $J_{ВЫХ}$ от $J_{ВХ}$.

3. Измерение зависимости выходного тока от входного тока для тиристорной оптопары АОУ103Б.

3.1. Установить переключатель П1 в положение «АОУ».

3.2. Установить значение входного тока $I_{ВХ} = 0$ регулятором $J_{ВХ}$. Изменяя входной ток с интервалом 1мА измерить значение выходного тока $J_{ВЫХ}$.

2.3. Построить график зависимости $J_{ВЫХ}$ от $J_{ВХ}$.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Элементы оптопары. Требования к источникам, средам, приемникам.
2. Параметры, характеризующие работу оптронов.
3. Характеристики резисторных оптопар.
4. Характеристики диодных оптопар.
5. Характеристики транзисторных и тиристорных оптопар.
6. Оптроны с открытым оптическим каналом.
7. Оптоэлектронные микросхемы.
7. Применение оптронов в цифровых и линейных схемах, в высоковольтных цепях, для обработки информации и др.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: Исследование явления преобразования оптического излучения в электрическую энергию в солнечных элементах.

Общие сведения

Солнечные фотопреобразователи (элементы, батареи) представляют собой полупроводниковые фотодиоды, оптимизированные для прямого преобразования излучения Солнца в электрическую энергию. Солнечные элементы работают только в фотovoltaическом режиме, функционально выступая в качестве электрических батарей или других подобных источников питания. Основными параметрами солнечного элемента являются:

- максимальная отдаваемая в нагрузку электрическая мощность P_{MAX} ;
- коэффициент полезного действия $P_{\text{MAX}}/P_{\text{C}}$, $P_{\text{C}} = \rho_{\text{C}} \cdot A$, где P_{C} - интегральная мощность солнечного излучения на элементе; A - площадь фоточувствительной поверхности;
- ЭДС холостого хода (разомкнутой цепи) U_{XX} ;
- ток короткого замыкания (максимальный фототок) $I_{\text{КЗ}}$;
- последовательное сопротивление R_{n} ;
- коэффициент формы $a = P_{\text{MAX}}/(U_{\text{XX}} \cdot I_{\text{КЗ}})$, характеризующий отклонение вида функции $U = f(I)$ от идеального прямоугольника;
- максимальная степень концентрации излучения, при которой элемент сохраняет эффективность преобразование $K_{\text{MAX}} = \rho_{\text{СК}}/\rho_{\text{C}}$, где $\rho_{\text{СК}}$ - плотность мощности сконцентрированного солнечного излучения.

В процессе эксплуатации для значений рабочего напряжения и тока справедливы неравенства $U_{\text{РАБ}} < U_{\text{ХХ}}$ и $I_{\text{РАБ}} < I_{\text{КЗ}}$. Экономические аспекты применения солнечных элементов характеризуются такими внешними комбинированными показателями, как отношение стоимости, площади активной поверхности, массы элемента к вырабатываемой этим элементом мощности. Если принять во внимание, что КПД преобразования в цикле *«растительный синтез – органическое топливо – тепловая машина – электрический генератор»* составляет лишь 0,001%, то привлекательность солнечных батарей становится очевидной.

При оптимизации фотопреобразователей определяющим моментом является учет особенностей солнечного спектра, лежащего в широком диапазоне 0,22 – 3 мкм и имеющего максимум вблизи $\lambda \approx 0,55$ мкм. В космосе кривая спектральной плотности солнечного излучения удовлетворительно аппроксимируется функцией Планка для абсолютно черного тела, нагретого до 5900 К; при прохождении через атмосферу кроме некоторого общего ослабления интенсивности возникают эффекты, связанные с резонансным избирательным поглощением света CO_2 , O_2 и главным образом парами воды, - на кривой зависимости спектральной плотности от длины волны излучения появляются дополнительные минимумы. В гелиоэнергетике приняты следующие условные обозначения различных солнечных воздействий: AM0 – в космосе, AM1 – на поверхности Земли, когда Солнце находится в зените; AM2, AM1,5 – на поверхности Земли, когда Солнце находится под углом 30 и 45° к горизонту. Цифры 1 и 2 обозначают, что солнечное излучение проходит одинарную и двойную толщину земной атмосферы. Принято, что AM1 характеризуется потоком $0,1 \text{ Вт/см}^2$, это приблизительно соответствует тому, что реально имеет место вблизи экватора. При AM2 поток излучения близок к 75 мВт/см^2 .

Типичной, «классической» структурой солнечного фотопреобразователя, является кремниевый монокристаллический $\text{n}^+\text{-p}$ – фотодиод. Его конструктивные особенности: максимально возможная площадь фоточувствительной по-

верхности; оптимальные значения толщины и удельного электрического сопротивления базовой области, падающего света и собирания генерируемых носителей n^+ -р – переходом; высокое время жизни неосновных носителей заряда (электронов) в базовой области для снижения рекомбинационных потерь; наличие антиотражающих покрытий, малая толщина контактных слоев для уменьшения паразитного поглощения коротковолновой составляющей спектра; использование гребенчатой или сетчатой конфигурации токосъемных электродов, обеспечивающих минимизацию последовательного сопротивления. Другие параметры фотодиодов, такие, как уровень шумов, емкость, постоянная времени релаксации и т. п., для солнечных элементов несущественны. Наиболее часто применяемыми материалами в солнечных элементах является кремний, монокристаллический и аморфный (КПД до 20%); арсенид галлия (КПД до 25%); селен; сульфид кадмия; теллурид кадмия и др. Используют также многослойные элементы, в комбинации Si-GaAs достигнут КПД более 30%.

Методика выполнения работы

Исследование преобразования излучения в электрическую энергию можно свести к изучению зависимости вольт-амперной характеристики диодной структуры от освещенности. Если полагать, что все падающее излучение достигает базовой области, для максимального значения фототока можно записать:

$$I_{кз} = A \cdot q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_c(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $\lambda_1 = 0,22$ мкм; $\lambda_2 = 3$ мкм; $N_c(\lambda)$ - спектральная плотность потока фотонов солнечного излучения, $\text{см}^{-2} \text{мкм}^{-1}$; Q и η - коэффициент собирания и квантовый выход. Если предположить, что время жизни неосновных носителей заряда велико, так что $Q(\lambda) = 1$ для всех значений λ , и $\eta(\lambda)$ описывается ступенчатой функцией: $\eta = 1$ при $\lambda < \lambda_{гр}$ и $\eta = 0$ при $\lambda > \lambda_{гр}$, то после преобразования плотность тока короткого замыкания:

$$j_{кз} = 8 \cdot 10^{-4} \int_{x_1}^{x_2} \lambda \frac{\partial \rho_c}{\partial \lambda} d\lambda,$$

где λ , мкм; $\partial \rho_c / \partial \lambda$, мВт · см⁻² · мкм⁻¹; $j_{кз}$, А/см². Проведя численное интегрирование с учетом распределения спектральной плотности излучения и полагая $\rho_c = 100$ мВт/см², можно получить теоретически предельное значение $j_{кз} \approx 40$ мА/см⁻² для кремниевого фотопреобразователя.

При наличии освещения выражение для вольт-амперной характеристик солнечного элемента имеет вид:

$$I = I_s [\exp(U \cdot q/kT) - 1] - I_{св},$$

где $I_{св}$ - световой ток; I_s - обратный ток насыщения, обусловленный термогенерацией. Знак $I_{св}$ взят отрицательным, так как он создан неосновными носителями и направлен в противоположную сторону. Тогда напряжение холостого хода (в разомкнутой цепи при $I = 0$):

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{св}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{св}}{I_s},$$

а мощность на выходе: $p = I \cdot U = I_s \cdot U [\exp(U \cdot q/kT) - 1] - I_{св} \cdot U$

Эта мощность достигает максимального значения P_{MAX} когда $\partial P / \partial U = 0$.

$$P_{MAX} = I_{св} \left[U_{xx} - \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{U_{MAX} \cdot q}{kT} \right) - \frac{kT}{q} \right],$$

где U_{MAX} - соответствующее P_{MAX} напряжение.

ЭДС и внутреннее сопротивление солнечного элемента определяют изменением двух значений тока на различных нагрузочных сопротивлениях:

$$I_1 = \frac{U_{xx}}{R_1 + r}; I_2 = \frac{U_{xx}}{R_2 + r}, U_1 + I_1 \cdot r = U_{xx} = U_2 + I_2 \cdot r,$$

где I_1, I_2 и U_1, U_2 - соответственно, токи, протекающие через нагрузочные сопротивления R_1, R_2 и падения напряжения на этих сопротивлениях. Отсюда:

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}, U_{xx} = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1}$$

Мощность падающего на элемент света рассчитывают, определяя освещенность приемной площадки E : $P_c = K \cdot E \cdot A$, где $K = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/лм - средний световой эквивалент мощности.

Порядок выполнения работы

1. Определение основных параметров солнечной батареи.

1.1. Установить источник света в положение, соответствующее минимальной освещенности. С помощью люксметра измерить освещенность вблизи поверхности солнечных элементов. Рассчитать величину светового потока Φ и плотность мощности светового излучения по формулам:

$$\Phi = E \cdot S \text{ и } P_c = K \cdot \Phi,$$

где $S = 1,5 \text{ см}^2$ - площадь поверхности элемента; $K = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/лм - средний световой эквивалент мощности. Результаты расчета Φ занести в таблицу 3.

1.2. Переключатель S поставить в положение 5, соответствующее полному включению батареи. Для некоторых двух средних значений сопротивления нагрузочного резистора R_H произвести измерения тока и напряжения. Результат занести в таблицу 3.

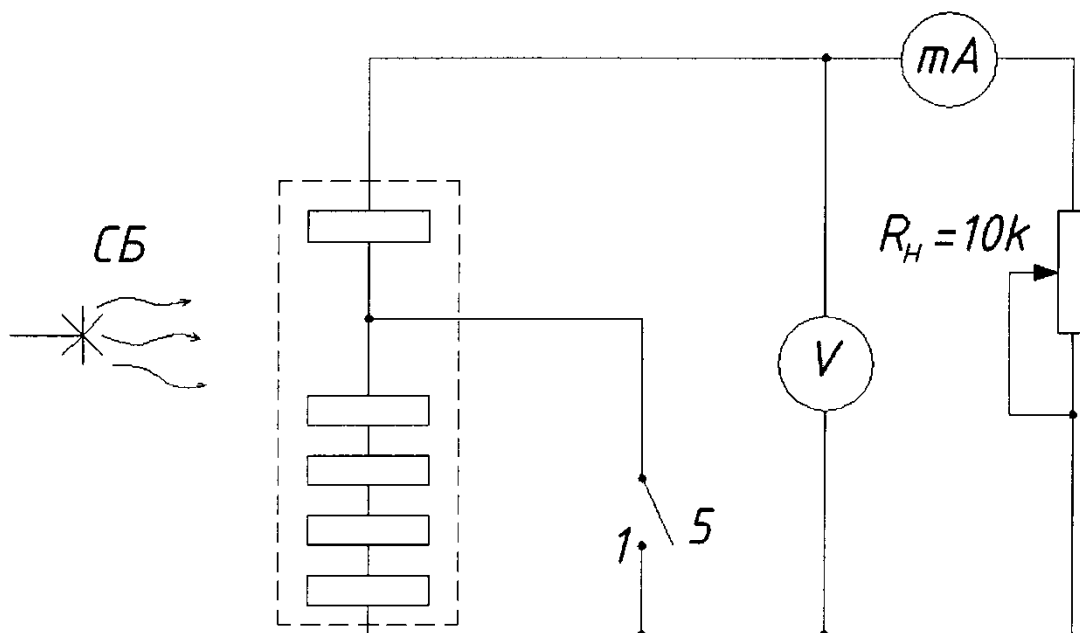


Рис. 5. Схема измерительного стенда

1.3. Произвести расчет ЭДС U_{xx} и внутреннего сопротивления r солнечного фотопреобразователя, занести данные в таблицу 3.

1.4. Переключатель S поставить в положение 1, соответствующее включению одного элемента и произвести измерения и расчеты по пп. 1.2 и 1.3.

Табл. 3.

№ п/п	$E,$ лк	$\Phi,$ лм	$I_5,$ мА	$U_5,$ мВ	$r_5,$ Ом	$U_{xx5},$ В	$I_1,$ мА	$U_1,$ мВ	$r_1,$ Ом	$U_{xx1},$ В

1.5. Установить источник освещения в следующие положения (20; 15; 10; 5 см) и повторить измерение и расчеты по пп. 1.2 – 4. Данные занести в табл. 3.

2. Исследование вольт-амперных характеристик солнечных элементов.

2.1. Выполнить действия по п. 1.1. Переключатель S поставить в положение 5, соответствующее полному включению батареи.

2.2. Поставить резистор R_H в положение с минимальным сопротивлением. Измерить значения тока и напряжения. Рассчитать величину полезной электрической мощности батареи: $P = I \cdot U$.

2.3. Переключатель S поставить в положение 1, соответствующее включению одного элемента, и выполнить измерения тока и напряжения и расчет мощности.

2.4. Провести измерения и расчеты по пп. 2.2, 2.3, 2.4 для 8 – 10 значений сопротивления, включая максимальное значение, соответствующее разомкнутой цепи. Результаты занести в таблицу 4.

Табл. 4.

Φ	№ п/п	$I_5,$ мА	$U_5,$ мВ	$P,$ мВт	$I_1,$ мА	$U_1,$ мВ	$P,$ мВт
Φ_{min}							
Φ_{max}							

2.5. Выбрать из полученных рассчитанных значений полезной электрической мощности P_{\max} и вычислить величину коэффициента формы

$$a = P_{\max} / U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}}.$$

2.6. Рассчитать КПД преобразователя энергии по формуле: $\text{КПД} = P_{\max} / P_{\text{С}}$.

2.7. Установить источник освещения на расстоянии 5 см от батареи и повторить действия по пп. 2.2 – 2.6. Результаты занести в продолжение таблицы 4.

Примечание. Если в качестве источника света используется лампа накаливания мощностью 100 Вт, для определения освещенности в зависимости от расстояния между лампой и батареей использовать табл. 5.

Табл. 5.

d, см	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$E \cdot 10^{-3}$, лк	30	12	6	4	3	2,2	1,9	1,5	1,1

Вопросы для самостоятельной работы

1. Поглощение оптического излучения и световая генерация носителей заряда в полупроводниковом p-n переходе.
2. Вольт-амперная характеристика фотодиода при освещении.
3. Основные параметры солнечных элементов.
4. Зависимость предельного КПД солнечных элементов от ширины запрещенной зоны используемых полупроводников.
5. Влияние концентрации солнечного излучения на характеристики фотопреобразователей.
6. Применение солнечных фотопреобразователей.

Учебное издание

Оптоэлектроника

Сборник лабораторных работ для студентов, обучающихся
по специальности 210201 «Проектирование и технология
радиоэлектронных средств»

Составитель САМОХВАЛОВ Михаил Константинович

Подписано в печать 30.09.2007. Формат 60*84/16. Бумага писчая.

Усл.печ.л. 2,56 . Тираж 60 экз. Заказ 1282

Ульяновский государственный технический университет,
432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев.Венец, 32.