

Министерство образования и науки Российской Федерации
Амурский государственный университет

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
Лабораторный практикум

Благовещенск
Издательство АмГУ
2018

УДК 535.8 (076.5)
ББК 32.854
Ф76

*Рекомендовано
учебно-методическим советом университета*

Рецензенты:

*Стукова Е.В., зав. кафедрой физики АмГУ, г.н.с. НОЦ АмГУ, д-р
физ.-мат. наук, доцент;*

*Милинский А. Ю., доцент кафедры физики и методики обучения
физике БГПУ, канд. физ.-мат. наук, доцент.*

Фомин Д.В.

Ф76 Физические основы оптоэлектроники. Лабораторный практикум / Д.В. Фомин. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2018.

Лабораторный практикум предназначен для бакалавров направления подготовки 03.03.02 «Физика», изучающих такие дисциплины как «Физические основы оптоэлектроники» и «Радиофизика и электроника». В работе приводятся принципиальные электрические схемы, пригодные для практических занятий.

Практикум может быть использован при обучении бакалавров направления подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии» по курсу «Основы радиотехники». Полезен он при изучении ряда смежных дисциплин – таких как «Основы радиоэлектроники», «Компьютерная электроника» и др.

В учебно-методическом пособии дается теоретический материал, достаточный для выполнения предлагаемых заданий. Упражнения в лабораторных работах выполняются на беспаячных макетных платах с использованием промышленных оптоэлектронных приборов и измерительной техники.

ББК 32.854

© Фомин Д.В., 2018.

© Амурский государственный университет, 2018.

Упражнения в лабораторных работах выполняются на беспаячных макетных платах с использованием промышленных оптоэлектронных приборов и измерительной техники. Устройство беспаячной макетной платы и пример сборки на ней электрической принципиальной схемы представлены на рис. 1.

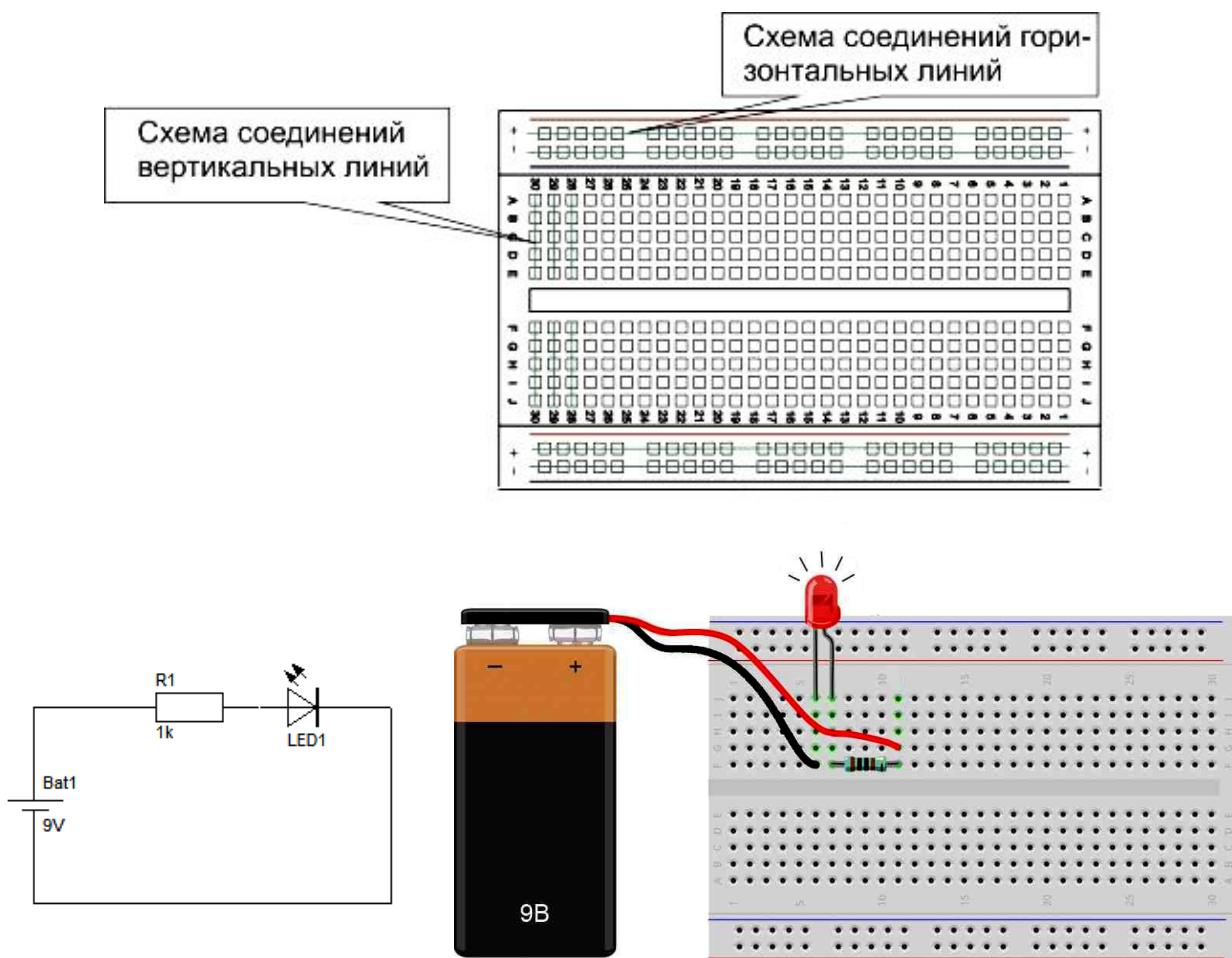


Рис. 1. Устройство беспаячной макетной платы на 400 точек и пример сборки на ней электрической принципиальной схемы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Цель работы – изучение явления генерации света в полупроводниках и характеристик светодиодов.

Краткая теория

Оптический диапазон в соответствии с определением Международной комиссии по освещению (МКО) включает в себя электромагнитные излучения с длиной волны λ от 1мм до 1 нм. Указанный диапазон достаточно широк, длинноволновая его часть – 0,1-1мм перекрывается с субмиллиметровыми радиоволнами, коротковолновая часть – 1-10 нм – включает в себя мягкое рентгеновское излучение. Оптическое излучение подразделяется на видимое, инфракрасное (ИК) и ультрафиолетовое (УФ). Инфракрасное излучение иногда разделяют на ближнюю ($\lambda < 3$ мкм) и дальнюю ($\lambda > 3$ мкм) области.

В оптоэлектронике пользуются двумя системами единиц: фотометрической и энергетической. Например, КПД излучателя определяют энергетическими единицами, а зрительное ощущение от его излучения – фотометрическими. В табл. 1 приведены основные энергетические и соответствующие им фотометрические единицы.

Таблица 1

Энергетическая величина	Обозначение	Единицы измерения	Фотометрическая величина	Обозначение	Единицы измерения
Энергия излучения	Q_e	Дж	Световая энергия	Q_ϕ	лм·с
Поток излучения (мощность)	Φ_e, P	Вт	Световой поток	Φ_ϕ	лм
Энергетическая светимость	R_e	Вт/м ²	Светимость	R_ϕ	лм/м ²
Энергетическая освещенность	E_e	Вт/м ²	Освещенность	E_ϕ	лк
Сила излучения	I_e	Вт/ср	Сила света	I_ϕ	кд
Энергетическая яркость	V_e	Вт/м ²	Яркость	V_ϕ	кд/м ²

Светодиод, или светоизлучающий диод (*англ. light-emitting diode, LED*) – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении.

Согласно теории проводимости твердого тела при прохождении тока через $p-n$ переход в результате рекомбинации дырок или электронов с носителями заряда противоположного знака всегда выделяется световая (фотоны) или тепловая (фононы) энергия. В соответствии с одним из положений квантовой теории в твердых кристаллах электроны могут иметь только определенную энергию; запрещенная энергетическая зона представляет собой промежуток между верхом валентной зоны и дном зоны проводимости. Эта зона характеризует полупроводник, а ее ширина, выраженная в электронвольтах (эВ), определяет длину волны испускаемого излучения.

Проведенный изготовителями анализ различных полупроводниковых материалов с точки зрения их пригодности для производства светодиодов по таким параметрам как длина волны, эффективность преобразования энергии и легкость легирования позволил остановить выбор на арсениде галлия (GaAs), фосфиде галлия (GaP) и арсениде фосфориде галлия (GaAsP) (рис. 2).

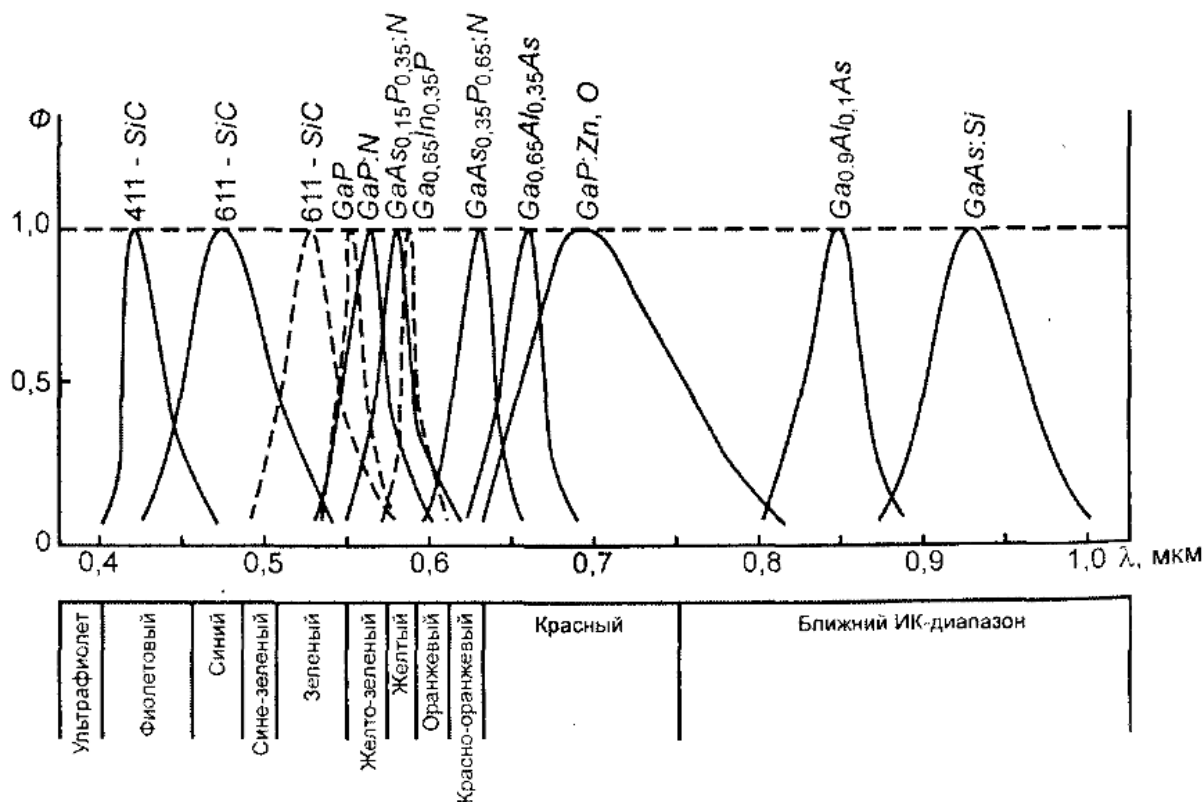


Рис. 2. Типичные спектры излучения светодиодов.

Описание лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 3.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Собрать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 3.

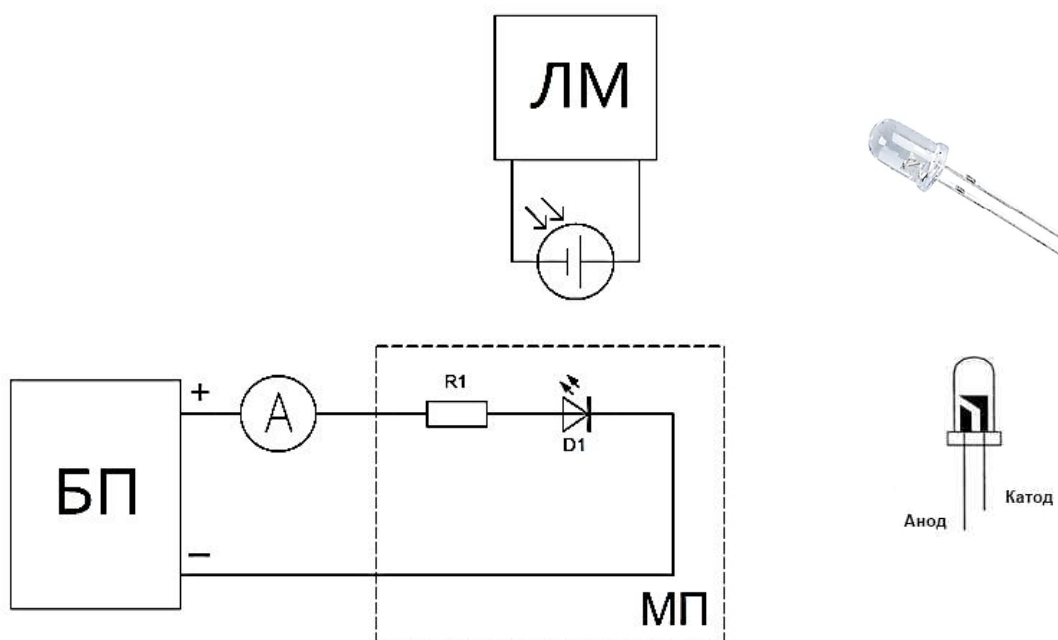


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема для исследования характеристик светодиода и цоколевка его выводов:

МП – беспаечная макетная плата (выделена пунктирной линией); ЛМ – люксметр; А – амперметр; БП – регулируемый блок питания; R1 – токоограничивающий резистор сопротивлением 240 Ом; D1 – светодиод (BL-L502UBC, BL-L502URC, BL-L502UGC или отечественные аналоги); набор соединительных проводов.

2. Произвести измерения зависимости освещенности E фотоэлемента люксметра от силы тока I , протекающего через светодиод BL-L502UBC синего цвета свечения (длина волны 470 нм) до максимального допустимого значения тока его проводимости $I = 30$ мА.

Рассчитать значение силы света светодиода по формуле:

$$I_v = \frac{ES}{\pi}, \quad (1)$$

где S – площадь приемной площадки фотоэлемента люксметра.

3. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

№	Марка светодиода	I , мА	E , лк	I_v , мкд
1				
2				
...				

4. Повторить измерения и расчеты для светодиодов другого цвета свечения и внести соответствующие записи в табл. 2.

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

6. Оформить отчет, включающий схему эксперимента, таблицу, расчетные формулы и полученные графики, а также пояснения о ходе выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Какой длине волны соответствует максимальная чувствительность человеческого глаза?
2. Что определяет длину волны испускаемого излучения в полупроводниковых светодиодах?
3. Каким может быть излучение светодиода?
4. Чем характеризуется эффективность работы светодиода?
5. Какое напряжение пробоя типично для светодиодов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНИКОВ

Цель работы – изучение воздействия оптического излучения и параметров приборов для обнаружения и регистрации излучения

Краткая теория

Работа фотоприемников основана на использовании внутреннего фотоэффекта в твердых телах. Поглощаемые полупроводником кванты освобождают носители заряда атомов либо решетки, либо примеси. Поскольку для каждого такого перехода требуется минимальная энергия, характерная для данного материала, каждый тип фотоприемника имеет определенную длинноволновую границу $\lambda_{зр}$, определяемую формулой:

$$\lambda_{зр} = \frac{1,24}{E_2 - E_1}, \quad (2)$$

где $\lambda_{зр}$ – в микрометрах; E_2 и E_1 – в электрон-вольтах. Разность $E_2 - E_1$ – энергетический зазор при переходе «зона–зона» (показан на рис. 4 как переход 1).

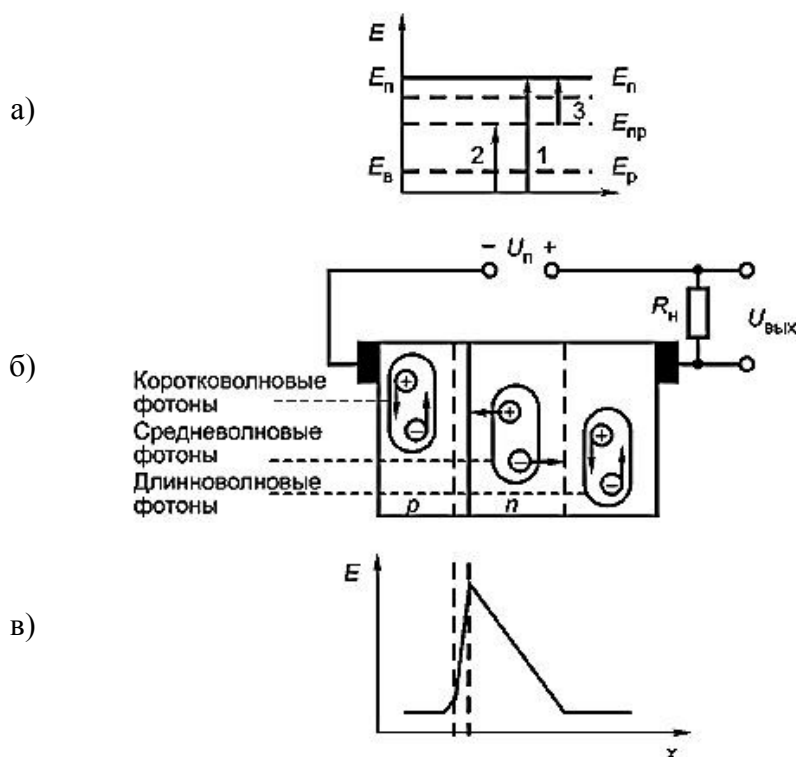


Рис. 4. Принцип действия фотоприемного прибора: а – энергетическая диаграмма; б – процессы при p–n-переходе; в – распределение электрического поля в структуре.

Возможен также переход «примесный уровень – зона» (переход 2 на рис. 4,а).

Переходы 1 и 2 используются для работы фотоприемников. Переход 3 «зона – примесный уровень» на практике использоваться не может из-за непроявления фотоэффекта в нагрузке.

Рассмотрим принцип действия фотоприемного прибора на основе р–п-перехода (рис. 4, б). При поглощении фотона в полупроводнике образуются пары «электрон – дырка». При их разделении возникает фототок, причем электроны перемещаются в n-области (против электрического поля), а дырки – в р-области (по полю). Вероятность разделения созданной фотоном пары «электрон – дырка» выше в том случае, если эта пара образуется в области полупроводника, находящейся под воздействием электрического поля. Альтернативой разделения является обычная рекомбинация пары «электрон–дырка», при которой не происходит какого-либо смещения заряда и потому не вносится вклад в фототок.

Электрическое поле распределяется в кристалле полупроводникового прибора неравномерно. В диффузионных областях р- и n-типа поле намного слабее, чем в области между ними, известной под названием обедненного слоя. Для эффективной работы фотоприемника необходимо, чтобы наибольшее число фотонов поглощалось в обедненном слое, т.е. фотоны не должны поглощаться до обедненного слоя и за его пределами. Глубина проникновения фотона в полупроводник до поглощения зависит от длины его волны. Фотоны с малой длиной волны поглощаются вблизи поверхности, а фотоны с большой длиной волны могут проникать через всю толщу кристалла. Поэтому для обеспечения широкой спектральной характеристики необходимо, чтобы кристалл фото диода имел очень тонкий р-слой, допускающий проникновение фотонов с малой длиной волны, и толстый обедненный слой – для получения максимального фототока от длинноволновых фотонов.

Толщина обедненной области зависит от удельного сопротивления полупроводника в этой области и обратного смещения. Обедненный слой существует и в том случае, если обратное смещение не приложено. Это обусловлено наличием «встроенного» поля, которое образуется вследствие диффузии через переход неосновных носителей. Напряжение обратного смещения расширяет обедненную область. Размеры обедненного слоя при любом напряжении больше в тех приборах, у которых вблизи р-п-перехода материал имеет более высокое удельное сопротивление. В то же время на обеих противоположных поверхностях кристалла для изготовления омических контактов требуется низкое удельное сопротивление. Фотоприемники с р-п-переходом, – например, солнечные батареи – изготавливают методом диффузии примеси р-типа в материал n-типа с низким удельным сопротивлением. Малая толщина диффузионного р-слоя обеспечивает высокую чувствительность к фотонам с малой длиной волны, но, чтобы расширить обедненную область для создания высокой чувствительности к фотонам с большой длиной волны, требуется относительно высокое обратное смещение. Глубокая диффузия примеси р-типа ухудшает чувствительность к излучению малой длины волны, однако благодаря созданию «плавного» перехода дает возможность уменьшить напряжение смещения, необходимого для обеспечения хорошей чувствительности к излучению большой длины волны.

Для повышения чувствительности к фотонам малой и большой длин волн при низком обратном смещении между р- и n-областями используют слой с вы-

соким удельным сопротивлением – *i*-слой. Фотоприемники, имеющие *i*-слой, получили название *p-i-n*-структур.

Описание лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрические принципиальные схемы, представленные на рис. 5.

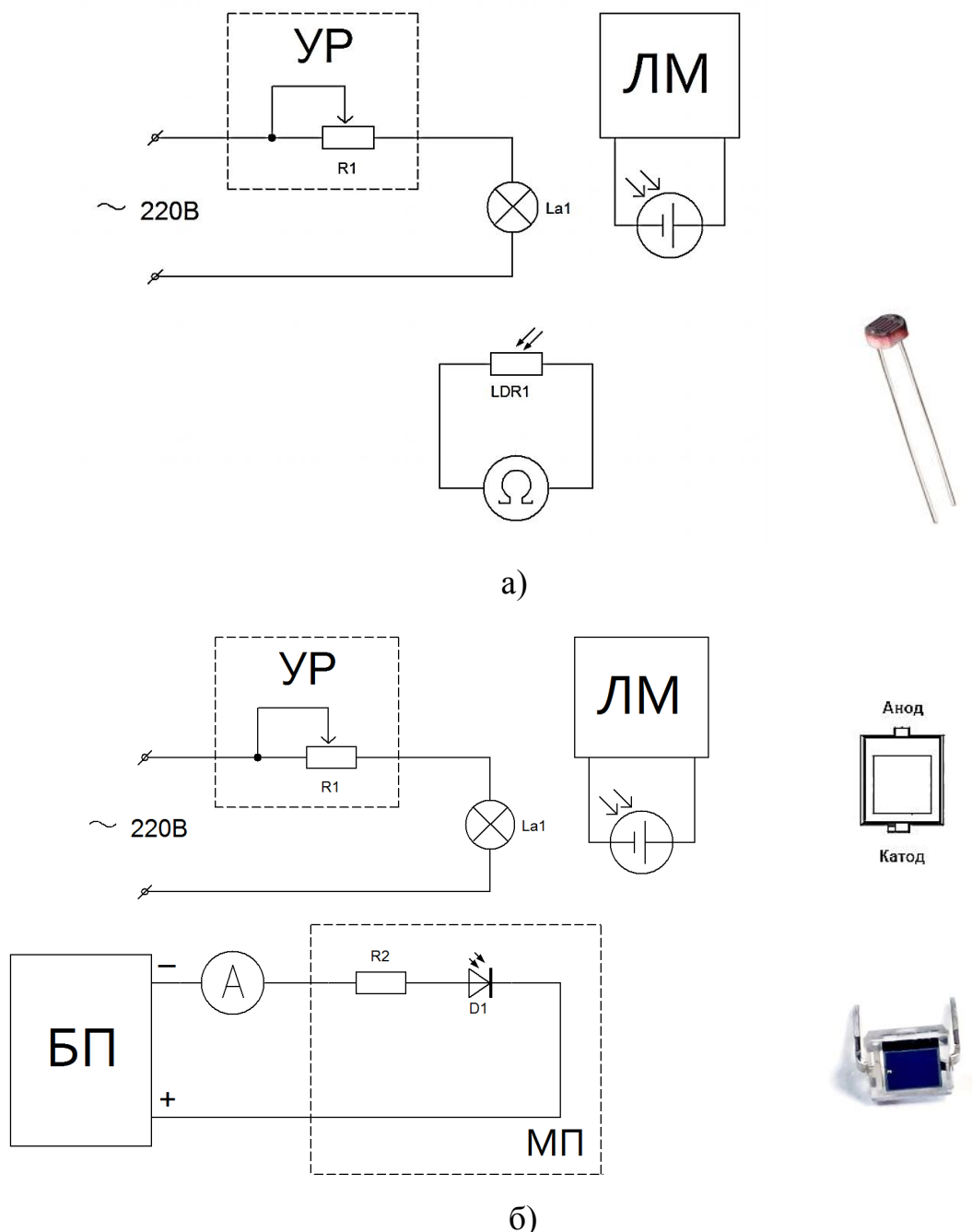


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема для исследования характеристик фоторезистора – а), фотодиода – б) и цоколевка его выводов:
 МП – макетная плата беспаячная (выделена пунктирной линией); ЛК – люксметр; А – амперметр; Ω – омметр; БП – регулируемый блок питания; УР – устройство регулировки яркости лампы; R1 и R2 – токоограничивающие резисторы сопротивлением 180-240 Ом; LRD1 – фоторезистор типа GL5506 (или отечественный аналог); D1 – фотодиод BPW34 (или отечественный аналог); набор соединительных проводов.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1. Изучение свойств фоторезистора.

1. Собрать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 5, а.
2. Поместить фоторезистор вместе с лампой и датчиком люксметра в светонепроницаемую коробку.
3. Измерить омметром темновое сопротивление фоторезистора.
4. Плавно вращая рукоятку устройства регулировки яркости лампы, постепенно увеличить яркость ее свечения до максимального. В процессе вращения рукоятки УР делать паузы для измерения сопротивления фоторезистора и показаний люксметра (не менее 15 измерений).
5. В Excel построить график зависимости сопротивления фоторезистора от его освещенности.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Изучение свойств фотодиода.

1. Собрать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 5, б.
2. Поместить фотодиод вместе с лампой и датчиком люксметра в светонепроницаемую коробку.
3. Измерить амперметром силу темнового тока фотодиода.
4. Плавно вращая рукоятку устройства регулировки яркости лампы, постепенно увеличить яркость ее свечения до максимального. В процессе вращения рукоятки УР делать паузы для измерения силы тока фотодиода и показаний люксметра (не менее 15 измерений).
5. В Excel построить график зависимости силы тока фотодиода от освещенности.
6. Оформить отчет, включающий схему эксперимента, таблицу с измерениями и полученные графики.

Контрольные вопросы

1. На чем основана работа фотоприемников?
2. Что является важнейшим параметром фотоприемника?
3. В чем особенность фотодиодов Шоттки?
4. Какой прибор называют гетерофотодиодом?
5. Как используется закон Бугера в оптоэлектронике?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

Цель работы – 1) изучение работы различных типов лазеров; 2) измерение угловой расходимости луча полупроводникового лазера.

Краткая теория

Лазер – генератор излучения, когерентного во времени и пространстве, основанный на использовании вынужденного излучения. Вынужденное излучение возникает следующим образом. При воздействии поля внешнего фотона находящийся в возбужденном состоянии атом переходит в другое энергетическое состояние с испусканием еще одного фотона, энергия которого будет равна энергии воздействующего на атом фотона. В системе возбужденных активных атомов (так называемой лазерной активной среде) возможно усиление пропускаемого через нее излучения, если создание фотонов за счет вынужденного излучения превосходит их потери, обусловленные поглощением и рассеянием. Усиление оптического излучения, основанное на использовании вынужденного излучения, известно как «лазерное усиление».

За счет энергии внешнего воздействия (так называемой энергии накачки) E_n часть электронов с нижних равновесных уровней E_1 переходит на более высокие уровни, а затем оказывается на уровне возбуждения E_2 , как показано на рис. 6.

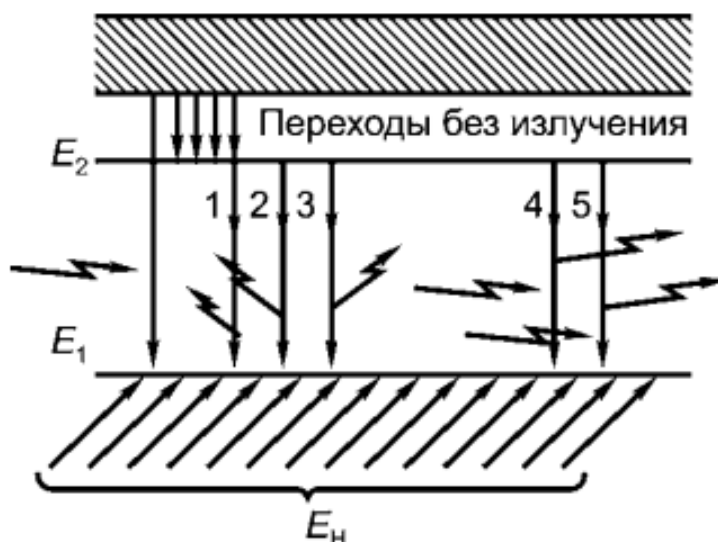


Рис. 6. Квантовые переходы в лазерном веществе.

Возвращение этих электронов с уровня E_2 на уровень E_1 сопровождается испусканием фотонов с длиной волны, определяемой по формуле (2).

Переход электронов с уровня E_2 на уровень E_1 может проходить по-разному. Возможен спонтанный переход, при котором момент испускания и направление вектора поляризации каждого фотона случайны, а результирующий поток излучения описывается лишь среднестатистическими параметрами (переходы

1...3 на рис. 6). Такой переход излучающих атомов из возбужденного состояния в равновесное не связан с вынуждающими фотонами и приводит к возникновению лишь некогерентного излучения. Одновременно со спонтанными переходами есть вероятность вынужденных переходов из энергетического состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 4, 5 на рис. 6). Эти переходы связаны с действием вынужденных фотонов, при этом все активные атомы излучают почти одновременно, взаимосвязанно и так, что испускаемые фотоны неотличимы от тех, которые их вызвали. Такое когерентное излучение называется вынужденным.

Таким образом, вынужденное излучение – это когерентное электромагнитное излучение, возникающее при вынужденных переходах и совпадающее по направлению, частоте, фазе и поляризации с вынуждающим излучением. Определим условия усиления вынужденного излучения. Уровни энергии, используемые при усилении или генерировании лазерного излучения, называют лазерными уровнями. Соответственно вынужденный переход между лазерными уровнями энергии, или зонами – это лазерный переход: он характеризуется длиной волны, определяемой по формуле (2). Наряду с лазерными переходами из состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 4, 5 на рис. 6) происходят спонтанные переходы из состояния E_2 в состояние E_1 (переходы 1...3 на рис. 6), а также переходы из состояния E_1 в более высокое энергетическое состояние, приводящие к поглощению излучения (переход 6 на рис. 6).

Лазерное усиление возможно в том случае, если число лазерных переходов больше, чем число спонтанных переходов и переходов, связанных с поглощением вынуждающего излучения. Таким образом, лазерное усиление объясняется тем, что вынуждающее излучение по мере распространения в лазерном веществе приобретает за счет лазерных переходов энергии больше, чем отдает вследствие поглощения.

Лазерное излучение характеризуется пространственно-временными и энергетическими параметрами. В группе пространственно-временных параметров выделяются следующие:

частота лазерного излучения ν – средняя частота (или средняя длина волны) λ спектра лазерного излучения;

ширина линии лазерного излучения σ – расстояние между точками контура спектральной линии лазерного излучения;

соответствует половине интенсивности линии в максимуме;

расходимость лазерного излучения Q – плоский или телесный угол, характеризующий угловое распределение энергии или мощности лазерного излучения;

время готовности лазера t – время, необходимое для достижения лазером эксплуатационных (номинальных) параметров с момента включения.

К энергетическим параметрам лазера прежде всего относятся энергия и мощность лазерного излучения. Энергия определяет энергетические возможности лазера. Мощность характеризует интенсивность излучения энергией лазером, концентрацию энергии во времени. Концентрация энергии (мощности) в пространстве определяется плотностью энергии (мощности) лазерного излучения, т. е. энергией (мощностью) лазерного излучения, приходящейся на едини-

цу площади сечения пучка лазерного излучения. Эффективность лазера как преобразователя энергии накачки в энергию излучения характеризует КПД, который равен отношению энергии или средней мощности, излучаемой лазером, к энергии или средней мощности, подводимой к лазеру. К энергетическим параметрам относится также порог генерирования лазера.

Можно выделить три основных режима работы лазеров:

режим непрерывного генерирования лазерного излучения (непрерывный режим);

лазеры, работающие в непрерывном режиме, называемые непрерывными;

режим импульсного генерирования лазерного излучения (импульсный режим), соответственно импульсные лазеры;

режим импульсно-периодического лазерного излучения, соответственно импульсно-периодические лазеры.

В полупроводниковых лазерах активным элементом являются кристаллы полупроводника, образующие резонатор и возбуждаемые либо инжекцией тока через p-n-переход, либо пучком электронов. Соответственно различают инжекционные лазеры и лазеры с электронным возбуждением. В полупроводниковых монолазерах индуцированные переходы происходят между занятыми электронными состояниями в зоне проводимости и вакантными состояниями в валентной зоне области p-n-перехода. Одно из главных отличий полупроводникового лазера от атомных молекулярных состоит в том, что эти переходы происходят не между двумя узкими энергетическими уровнями, а между состояниями, распределенными по энергии.

Первые инжекционные лазеры были созданы из арсенида галлия в форме параллелепипеда, с планарным диффузионным р0п-переходом, расположенным перпендикулярно двум противоположным торцам полупроводникового кристалла, как показано на рис. 7.

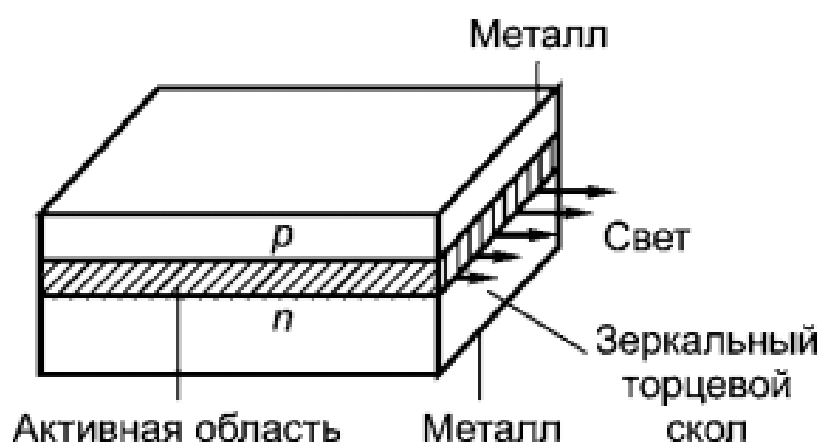


Рис. 7. Структура инжекционного монолазера.

Поскольку показатель преломления полупроводникового кристалла выше показателя преломления воздуха, его сколотые торцевые поверхности действуют как зеркала, так что генерация излучения и его усиление происходят внутри резонатора Фабри – Перо. При определенном пороговом уровне усиление пре-

вышает потери в объеме и на зеркалах для некоторой моды и лазер начинает генерировать.

При включении инжекционного лазера в прямом направлении и при малом токе накачки, как и в СИД, возникает спонтанное излучение. Из множества спонтанных фотонов лишь некоторые отразятся от зеркала и пройдут в плоскости активного слоя. С увеличением тока накачки растет число электронов на верхнем энергетическом уровне в зоне проводимости (в этом случае говорят, что имеет место инверсная населенность уровня). При этом спонтанный фотон вызывает переход электрона из зоны проводимости в валентную зону, где происходит рекомбинация и появляется стимулированный фотон.

Таким образом, вместо одного фотона появляются два. Когда ток накачки достигает значения, называемого пороговым, этот процесс нарастает лавинообразно: два фотона порождают четыре, четыре – шестнадцать, и т.д. В результате мощность излучения резко возрастает. Часть мощности излучения выводится наружу через оба зеркала (один из выходов инжекционного лазера может быть использован для контроля излучаемой мощности с помощью фотодиода). Заметим, что величина порогового тока зависит от температуры окружающей среды. При увеличении температуры мощность излучения на заданной длине волны резко падает.

Оборудование

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 8, а также схему проведения эксперимента, представленную на этом же рисунке.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Собрать схему, представленную на рис. 8. Выставить на выходе БП напряжение 3В.

2. Включить лазер и получить изображение пятна излучения на листе бумаги, расположенном в 2–3 м от лазера (**Следить за тем, чтобы излучение лазера не попало в глаза!**). Измерить размеры пятна в вертикальной a_1 и горизонтальной b_1 плоскостях. Полученные данные записать.

3. Передвинуть лист бумаги от лазера дальше на 2–3 м (измерить это расстояние и зафиксировать). Измерить размеры пятна в вертикальном a_2 и горизонтальном b_2 направлениях. Полученные данные записать.

4. Выключить лазер. Рассчитать угловую расходимость излучения лазера в горизонтальном и вертикальном направлениях по формулам, представленным ниже. Полученные значения угла в радианах перевести также в градусы.

Угол расходимости лазерного луча в горизонтальной плоскости определяют по формуле:

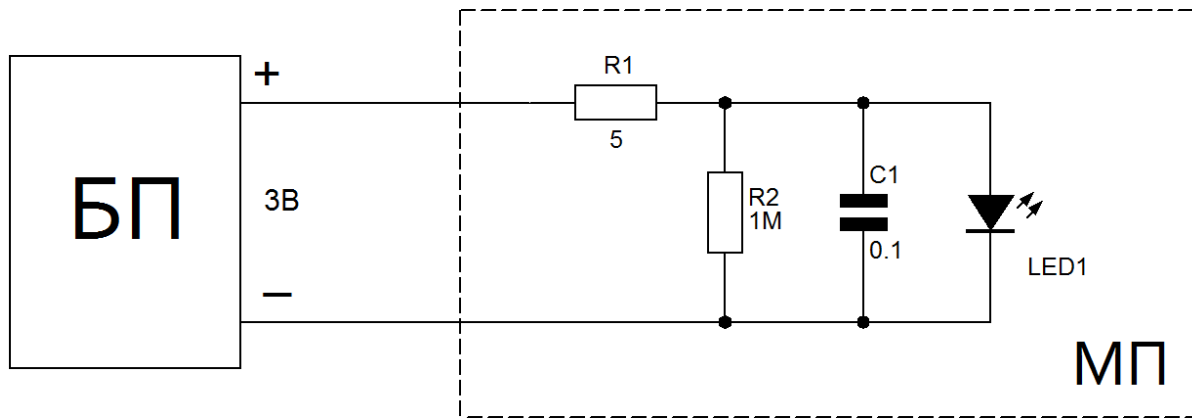
$$\varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_2 - a_1}{l} \quad (3)$$

Угол расходимости лазерного луча в вертикальной плоскости определяют по формуле:

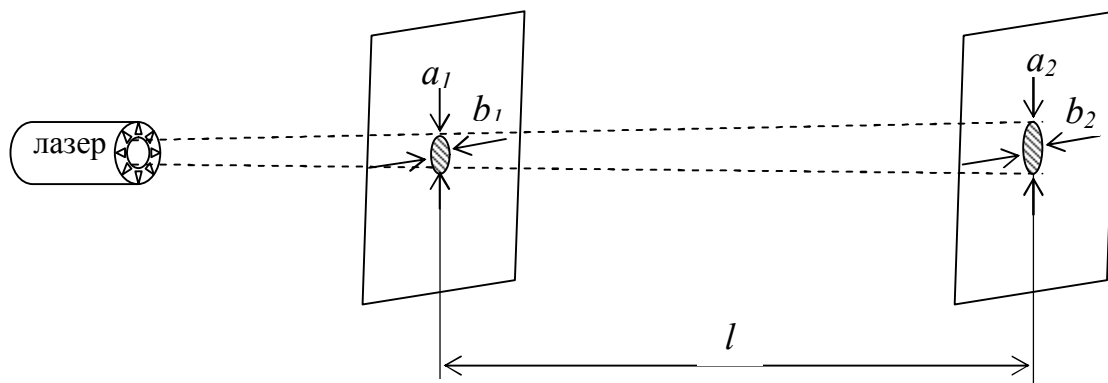
$$\varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b_2 - b_1}{l} \quad (4)$$

5. Выключить электрическую схему.

6. Составить подробный отчет о проделанной работе, включающий схему эксперимента, расчетные формулы, результаты расчетов и пояснения о ходе выполнения работы.



а)



б)

Рис. 8. Электрическая принципиальная схема включения лазерного диода – а) и схема проведения эксперимента – б):

МП – макетная плата беспаячную (выделена пунктирной линией); БП – регулируемый блок питания; УР – устройство регулировки яркости лампы; R1 и R2 – резисторы сопротивлением 5 Ом и 1 МОм соответственно; C1 – конденсатор емкостью 0,1 мкФ; LED1 – лазерный диод ($U=3$ В, 650nm, 5 мВт); набор соединительных проводов.

Контрольные вопросы

1. Что такое инверсная населенность уровней и как она создается?
2. Какие виды накачки лазера вы знаете?
3. Чем различаются временная и пространственная когерентность?
4. Какие типы лазеров вы знаете?
5. Объясните устройство и принцип работы полупроводникового лазера.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ОПТРОНОВ

Цель работы – изучение входных и выходных характеристик диодно-диодных и диодно-транзисторных оптронов.

Краткая теория

Оптронами называются оптоэлектронные приборы, в которых имеются излучатели и фотоприемники, используются оптические и электрические связи, а также конструктивно соединенные друг с другом элементы. Некоторые разновидности оптронов известны как оптопары, или оптоизоляторы. Принцип действия любого оптрона основан на двойном преобразовании энергии. В излучателях энергия электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках – наоборот: оптический сигнал вызывает электрический ток либо напряжение или приводит к изменению сопротивления фотоприемника. Наибольшее распространение получили оптроны с внешними электрическими выходами и выходными сигналами и внутренними оптическими сигналами. Схематично один из таких приборов представлен на рис. 9.

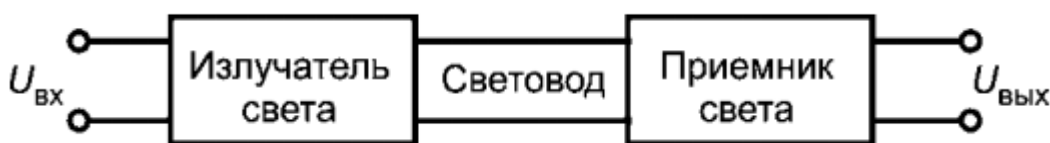


Рис. 9. Вариант конструкции широко распространенного типа диодно-диодного оптрона с внутренней оптической связью.

В электрической схеме подобный оптрон выполняет функцию выходного элемента – фотоприемника с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входа и выхода. Излучатель является источником фотонов,

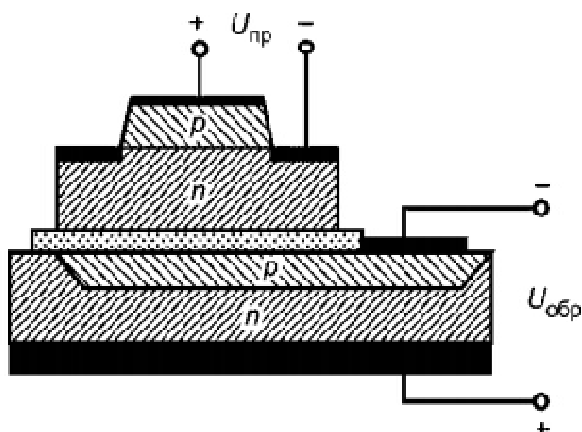


Рис. 10. Пример конструкции широко распространенного типа диодно-диодного оптрона с внутренней оптической связью.

которым может служить светодиод или миниатюрная лампа накаливания. Оптической средой может быть воздух, стекло, пластмасса или волоконный световод. В качестве фотоприемников используются фотодиоды, как в конструкции, изображенной на рис. 10, а также фототранзисторы, фототиристоры и фоторезисторы. Очень часто используются интегральные фотодиодно-транзисторные структуры. Различные комбинации этих элементов позволяют получить весьма разнообразные входные, выходные и передаточные характеристики. На практике приме-

няется и другая разновидность оптронов: использующая внешние входные и выходные оптические сигналы и внутренние электрические сигналы, как показано на рис. 11. Обычно такие приборы имеют усилители фототока.

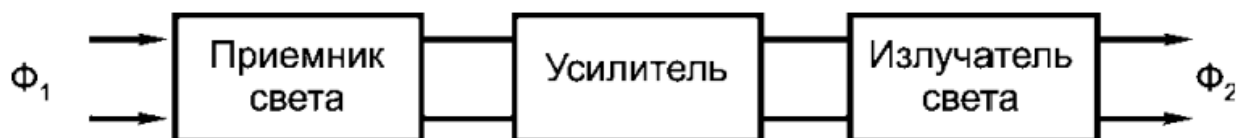


Рис. 11. Оptron с внешней оптической связью.

В отдельных случаях применяются оптроны, одновременно использующие оптические и электрические связи. С конструкторско-технологической точки зрения излучатель и фотоприемник равноправны. Эффективность преобразования энергии и срок службы оптрона в основном определяет излучатель. При разработке излучателя для оптрона основная трудность заключается в оптимизации согласования с фотоприемником. К параметрам, подлежащим оптимизации, относятся коэффициент усиления, ширина полосы частот, размеры оптического окна, электрические характеристики. Поскольку желательно иметь малое последовательное сопротивление, наилучшим вариантом является излучатель на основе GaAs. Стараются добиться малого прямого напряжения, но это менее важно, чем оптимизация усиления частотной полосы.

Принципиальные физические достоинства оптронов обусловлены использованием фотонов в качестве носителей информации, заключаются в обеспечении очень высокой электрической изоляции входа и выхода, однонаправленности потока информации, отсутствии обратной связи – с выхода на вход в широкой полосе пропускания.

Кроме того, важными достоинствами оптронов являются:

возможность бесконтактного (оптического) управления электронными объектами и обусловленные этим разнообразие и гибкость конструкторских решений управления;

невосприимчивость оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей, что в случае оптронов с протяженным оптическим каналом обуславливает высокую помехозащищенность, а также исключает взаимные наводки;

возможность создания функциональных микронэлектронных устройств с фотоприемниками, характеристики которых под действием оптического излучения изменяются по заданному (сколь угодно сложному) закону;

расширение возможностей управления выходным сигналом оптрона путем воздействия (в том числе и неэлектрического) на материал оптического канала и, как следствие, создание разнообразных датчиков и приборов для передачи информации.

Современным оптронам присущи и определенные недостатки: низкий КПД, обусловленный необходимостью двойного преобразования энергии (электричество–излучение–электричество), значительная потребляемая мощность, сильная зависимость параметров от температуры, высокий уровень собственных

шумов, конструктивно-технологическое несовершенство, связанное в основном с использованием гибридной технологии. Перечисленные недостатки оптронов устраняются по мере совершенствования материалов, технологии, схемотехники.

Описание лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрические принципиальные схемы, представленные на рис. 12.

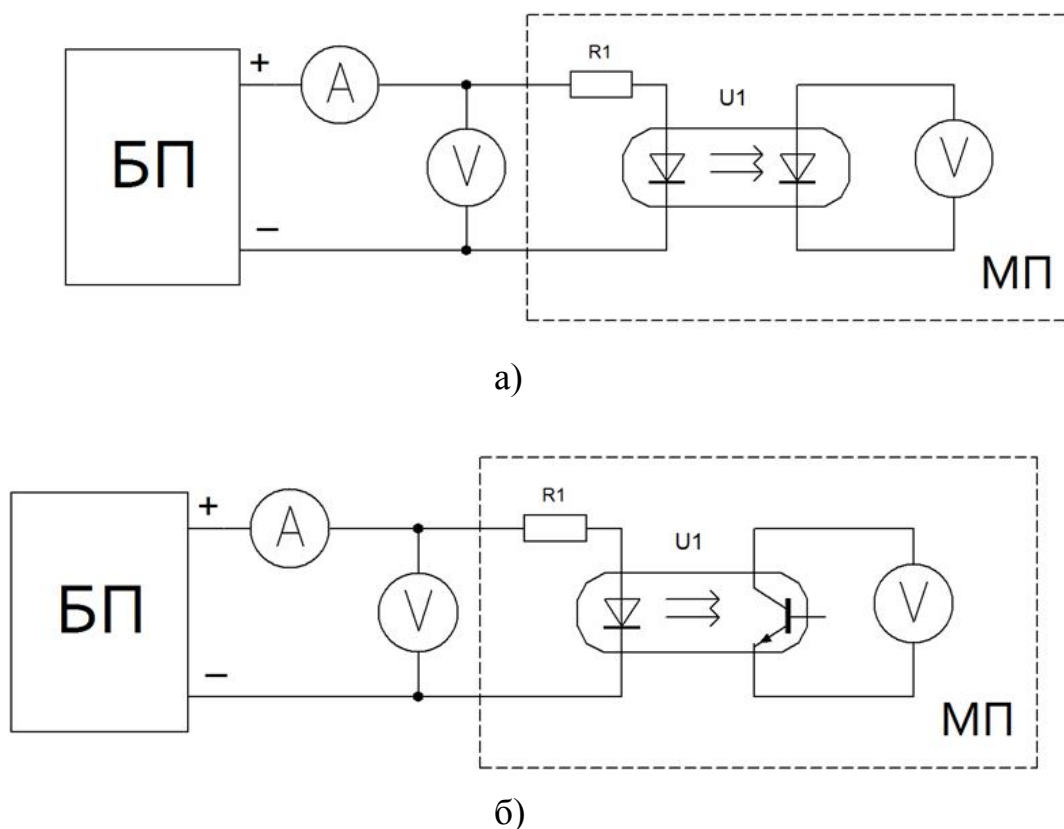


Рис. 12. Электрическая принципиальная схема для исследования диодно-диодного оптрона – а) и диодно-транзисторного оптрона – б):

МП – макетная плата беспаячная (выделена пунктирной линией); А – амперметр; V – вольтметр; БП – регулируемый блок питания; R1 – токоограничивающий резистор сопротивлением 1 кОм; LRD1 – фоторезистор типа GL5506 (или отечественный аналог); U1.1 – диодно-диодный оптрон АОД101А; U1.2 – диодно-транзисторный оптрон 4N35 (или отечественный аналог); набор соединительных проводов.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Собрать схему, представленную на рис. 12а).
2. Регулируя ток во входной цепи, добиться появления напряжения на выводах фотодиода.
3. Провести измерения входных и выходных характеристик. Данные занести в табл. 3.
4. Построить ВАХ входной характеристики.

На рис. 13 приведена цоколевка оптронов.

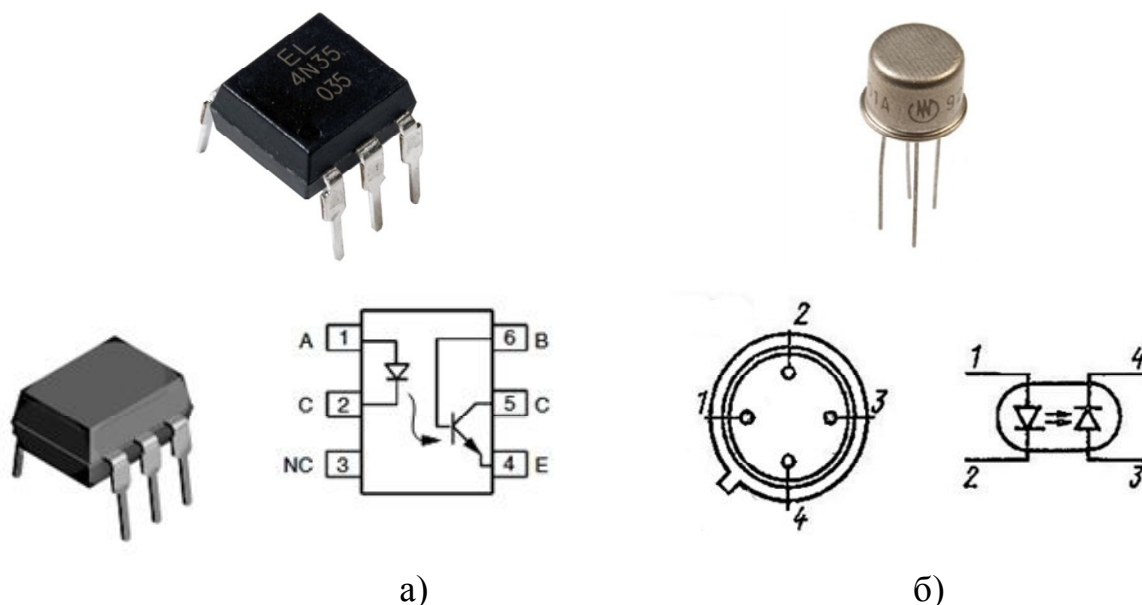


Рис.13. Цоколевка оптронов: а – диодно-транзисторного 4N35; б – диодно-диодного АОД101А.

УПРАЖНЕНИЕ 2.

1. Собрать схему, представленную на рис. 12б).
2. Регулируя ток во входной цепи, добиться появления напряжения на выводах фототранзистора.
3. Провести измерения входных и выходных характеристик. Данные занести в таблицу, аналогичную табл. 3.

Таблица 3

№	$I_{вх}, \mu A$	$U_{вх}, mV$	$U_{вых}, mV$
1			
.			
.			
10			

4. Построить ВАХ входной характеристики.
5. Составить отчет о проделанной работе, включив в него данные из обоих упражнений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие приборы называют оптронами?
2. Какие оптроны могут иметь коэффициент передачи больше единицы?
3. Какие вы знаете оптопары?
4. Что означает словосочетание «гальваническая развязка»?
5. Что такое волстрон?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы – изучить явления преобразования оптического излучения в электрическую энергию в солнечных элементах.

Краткая теория

Фотоэлектрическая генерация энергии обусловлена пространственным разделением положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении в полупроводнике электромагнитного излучения. В присутствии электрического поля эти заряды могут создавать во внешней цепи электрический ток. В местах переходов или неоднородностей материала существуют внутренние электростатические поля. Внутренние поля фотоэлементов на основе структур полупроводник – полупроводник или металл – полупроводник создают разность потенциалов около 0,5 В и плотность тока порядка 200 А/м^2 при плотности потока солнечного излучения около 1 кВт/м^2 .

Устройства на полупроводниковых переходах обычно называются фотопреобразователями, или солнечными элементами. Они сами являются источниками ЭДС. Фотоэлектрические устройства преобразуют лучистую энергию в электрическую. Эффективность использования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи. В современной солнечной энергетике широко применяются полупроводниковые преобразователи из химически чистого кристаллического кремния. Кремний – широко распространенный в земной коре элемент, песок и кварц – это диоксид кремния. Простейший солнечный элемент на основе монокристаллического кремния представляет собой следующую конструкцию: на малой глубине от поверхности кремниевой пластины *p*-типа сформирован *p-n*-переход с тонким металлическим контактом; на тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Пусть *p-n*-переход расположен вблизи от освещаемой поверхности полупроводника. При использовании солнечного элемента в качестве источника электроэнергии к его выводам должно быть подсоединено сопротивление нагрузки R_n . Рассмотрим сначала два крайних случая: $R_n = 0$ (режим короткого замыкания) и $R_n = \infty$ (режим холостого хода). Зонные диаграммы для этих режимов изображены на рис. 14 (а, б). В первом случае зонная диаграмма освещенного *p-n*-перехода не отличается от зонной диаграммы при термодинамическом равновесии (без освещения и без приложенного напряжения смещения), поскольку внешнее закорачивание обеспечивает нулевую разность потенциалов между *p-n*-областями. Однако через *p-n*-переход и внешний проводник течет ток, обусловленный фотогенерацией электронно-дырочных пар в *p*-области. Фотоэлектроны, образовавшиеся в непосредственной близости от области объемного заряда, увлекаются электрическим полем *p-n*-перехода и попадают в *n*-область. Остальные электроны диффундируют к *p-n*-переходу, стараясь вос-

полнить их убыль, и в конечном итоге также попадают в n -область. В n -области возникает направленное движение электронов к тыльному металлическому контакту, перетекание во внешнюю цепь и в контакт к p -области. На границе контакта к p -области происходит рекомбинация подошедших сюда электронов с фотогенерированными дырками.

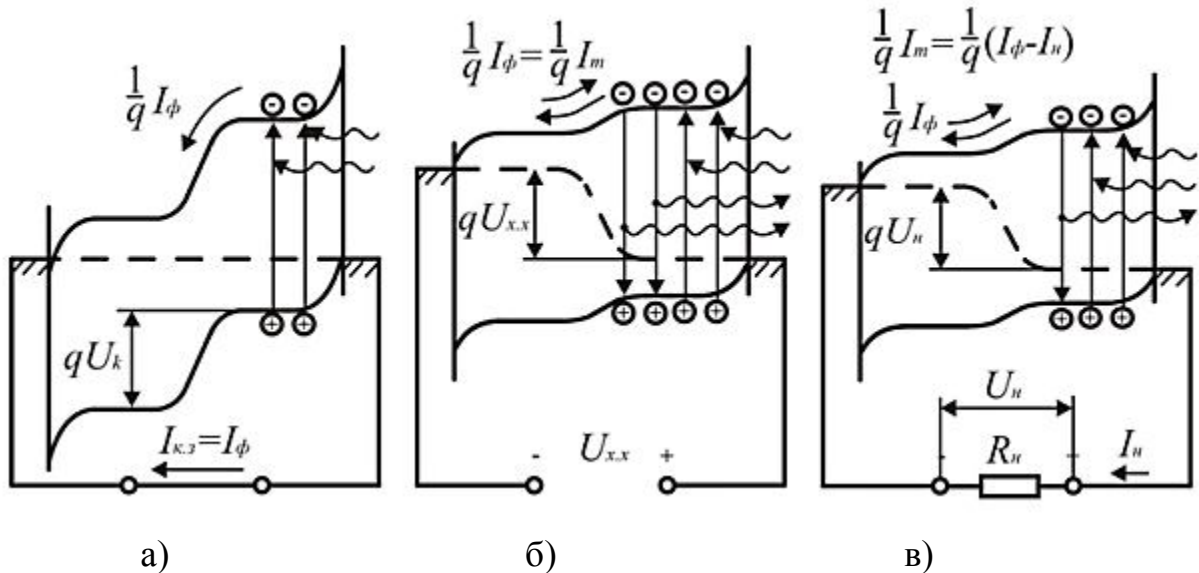


Рис. 14. Зонные энергетические диаграммы p - n -перехода при освещении в разных режимах: а) короткого замыкания; б) холостого хода; в) включения на сопротивление нагрузки.

При разомкнутой внешней цепи p - n -перехода (рис. 14, б) фотоэлектроны, попадая в n -область, накапливаются в ней и заряжают n -область отрицательно. Остающиеся в p -области избыточные дырки заряжают p -область положительно. Возникающая таким образом разность потенциалов является напряжением холостого хода U_{xx} . Полярность U_{xx} соответствует прямому смещению p - n -перехода.

Поток генерированных светом носителей образует фототок I_ϕ . Величина I_ϕ равна числу фотогенерированных носителей, прошедших через p - n -переход в единицу времени:

$$I_\phi = q \frac{P_u}{h\nu}, \quad (5)$$

где q – величина заряда электрона; P_u – мощность поглощенного монохроматического излучения.

Здесь предполагается, что в полупроводнике каждый поглощенный фотон с энергией $h\nu \geq E_g$ создает одну электронно-дырочную пару. Это условие хорошо выполняется для солнечных элементов на основе Si .

При нулевых внутренних омических потерях в солнечном элементе режим короткого замыкания (рис. 14, а) эквивалентен нулевому напряжению смещения p - n -перехода, поэтому ток короткого замыкания $I_{кз}$ равен фототоку: $I_\phi = I_{кз}$.

В режиме холостого хода (рис. 14, б) фототок уравнивается «темновым» током I_T – прямым током через p - n -переход, возникающим при напряжении смещения U_{xx} . Абсолютное значение «темнового» тока:

$$I_m = I_0 e^{\left(\frac{qU_{xx}-1}{AkT}\right)} = I_\phi, \quad (6)$$

откуда при $I_\phi \gg I_0$:

$$U_{xx} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0}\right), \quad (7)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0,86 \cdot 10^{-4}$ эВ/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; I_0 – ток насыщения; A – параметр вольт-амперной характеристики p - n -перехода, меняющийся для разных отрезков графика от 1 до 2 по следующему закону:

$$A = 0,434 \frac{q}{kT} \Delta U, \quad (8)$$

где ΔU – приращение напряжения при приращении плотности тока (или абсолютного значения тока) по касательной на один порядок.

«Темновой» ток сопровождается рекомбинацией неосновных носителей тока (в данном случае – электронов в p -области). При актах рекомбинации потенциальная энергия электронно-дырочных пар выделяется либо посредством излучения фотонов с $h\nu \sim E_g$, либо расходуется на нагревание кристаллической решетки. Оба процесса схематически показаны дополнительными стрелками на рис. 14, б. Таким образом, режим холостого хода солнечного элемента эквивалентен режиму работы светодиодов, а также выпрямительных диодов в пропускном направлении. Найдем обобщенное выражение для вольт-амперной характеристики освещенного p - n -перехода. Для этого предположим, что к нему подключен источник питания с варьируемым напряжением. При положительном напряжении смещения фототок I_ϕ вычитается из «темнового» тока p - n -перехода, а при отрицательном – суммируется с ним. Выражение для вольт-амперной характеристики записывается в виде:

$$I = I_0 e^{\left(\frac{qU_{xx}-1}{AkT}\right)} - I_\phi. \quad (9)$$

Рассмотрим подключение к p - n -переходу варьируемого сопротивления нагрузки (рис. 14, в). Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением I_ϕ , а сам ток нагрузки I_n равен результирующему току через p - n -переход. Принимая направление тока I_ϕ за положительное, для I_n можно записать:

$$I_n = I_\phi - I_0 e^{\left(\frac{qU_{xx}-1}{AkT}\right)}, \quad (10)$$

где U_n – напряжение на нагрузке, равное напряжению на p - n -переходе. Последнее выражение описывает нагрузочную вольт-амперную характеристику освещенного p - n -перехода. При известных параметрах нагрузочной вольт-амперной характеристики и заданном значении R_n величины I_n и U_n находятся методом последовательных приближений.

Таким образом, освещенный p - n -переход может быть представлен в виде эквивалентной схемы, где источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения p - n -перехода, а диод представляет собой неосвещенный p - n -переход. При варьировании R_n фототок перераспределяется между нагрузкой и p - n -переходом.

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузке, определяется по формуле:

$$P = I_n U_n = I_\phi U_n - I_0 e^{\left(\frac{qU_{xx}}{AkT} - 1\right)}. \quad (11)$$

В режимах короткого замыкания и холостого хода $P = 0$, поскольку либо I_n , либо U_n равно нулю.

Таким образом, простейший солнечный элемент состоит из двух соединенных между собой кремниевых пластинок. Свет, падающий на верхнюю пластинку, выбивает из нее электроны, посылая их на нижнюю пластинку. Так создается ЭДС элемента. Последовательно соединенные элементы являются источником постоянного тока. Несколько объединенных фотоэлектрических преобразователей представляют собой солнечную батарею.

Описание лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрическую принципиальную схему, представленную на рис 15.

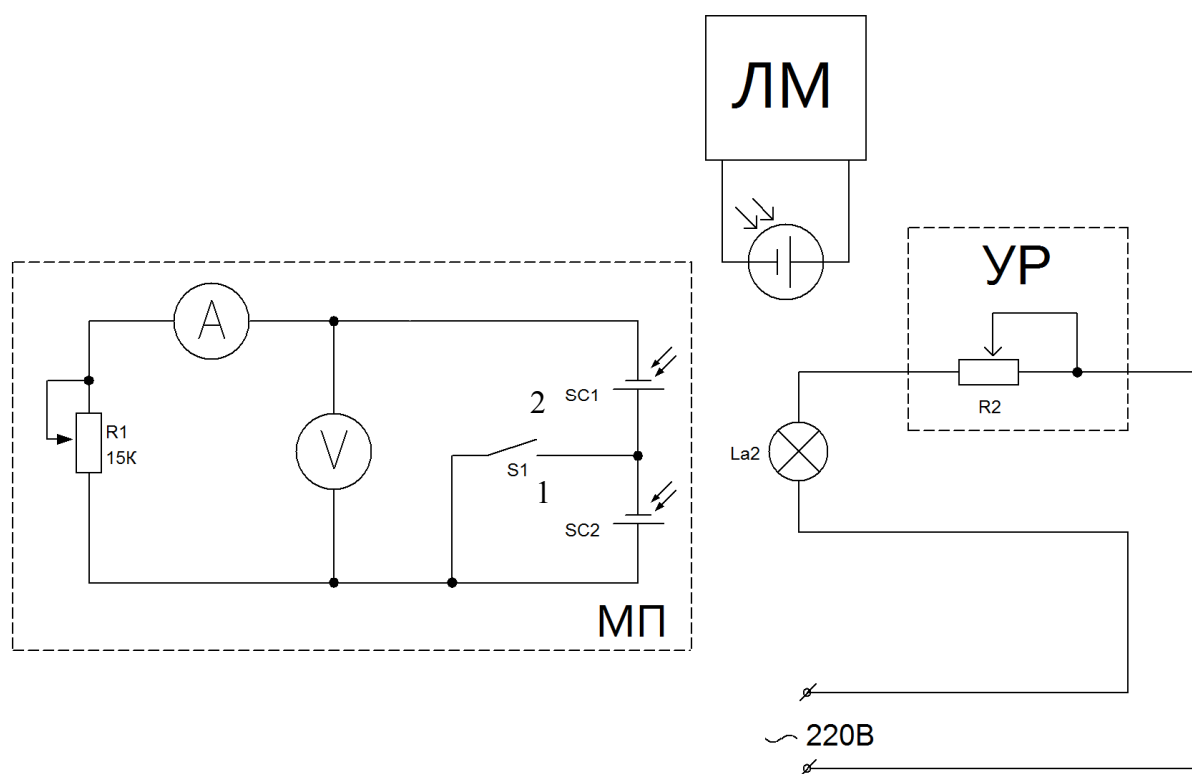


Рис. 15. Электрическая принципиальная схема для исследования солнечных фотопреобразователей:

МП – макетная плата беспаечная (выделена пунктирной линией); А – амперметр; V – вольтметр; R1 – резистор нагрузки сопротивлением 15 кОм; SC1 и SC2 – солнечные элементы; ЛК – люксметр; УР – устройство регулировки яркости лампы; LA2 – лампа; набор соединительных проводов.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1. Определение основных параметров солнечной батареи.

1. Собрать схему согласно предложенной на рис. 15. 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 P_C по формулам:

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

где S – площадь поверхности элемента (измерить стороны и посчитать); $K = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/лм – средний световой эквивалент мощности. Результаты расчета Φ занести в табл. 4.

Таблица 4

№	$E,$ лк	$\Phi,$ лк	$I_{21},$ мА	$I_{22},$ мА	$U_{21},$ мВ	$U_{22},$ мВ	$r_2,$ Ом	$U_{xx2},$ В	$I_{11},$ мА	$I_{12},$ мА	$U_{11},$ мВ	$U_{12},$ мВ	$r_1,$ Ом	$U_{xx1},$ В
1														
...														

2. Переключатель S поставить в положение 2 (разомкнуть), соответствующее полному включению батареи. Для некоторых двух средних значений сопротивления нагрузочного резистора R_l произвести измерения тока I_{21}, I_{22} и напряжения U_{21}, U_{22} . Результаты занести в табл. 4.

3. Произвести расчет ЭДС U_{xx} и внутреннего сопротивления r солнечного фотопреобразователя, занести данные в таблицу 4.

4. Переключатель S поставить в положение 1 (замкнуть), соответствующее включению одного элемента, и произвести измерения и расчеты по п.2. и п.3.

5. Установить источник освещения в следующие положения (15 см, 10 см, 5 см) и повторить измерение и расчеты по п. 2 – 4. Данные занести в табл. 4.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Исследование вольт-амперных характеристик солнечных элементов

1. Выполнить действия по п. 1.1. упражнения 1.

2. Переключатель S поставить в положение 2, соответствующее полному включению батареи.

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

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

5. Провести измерения и расчеты по п. 2.2, 2.3, 2.4 упражнения 2 для 8 – 10 значений сопротивления, включая максимальное значение, соответствующее разомкнутой цепи. Результаты занести в табл. 5.

Таблица 5

Φ	№	$I_2, \text{мА}$	$U_2, \text{мВ}$	$P, \text{мВт}$	$I_1, \text{мА}$	$U_1, \text{мВ}$	$P, \text{мВт}$
$\Phi_{\text{мин}}$	1						
	2...10						
$\Phi_{\text{макс}}$	1						
	2...10						

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

$$a = P_{\text{макс}} / U_{\text{хх}} \cdot I_{\text{кз}}$$

7. Рассчитать КПД преобразователя энергии по формуле:

$$\text{КПД} = P_{\text{макс}} / P_{\text{с}}$$

8. Установить источник освещения на расстоянии 5 см от батареи и повторить действия по п. 2.2 – 2.7 упражнения 2. Результаты занести в табл. 5.

9. Оформить отчет, включающий схему эксперимента, таблицы, расчетные формулы и полученные данные.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют фотовольтаическим?
2. Как устроен солнечный элемент на основе монокристаллического кремния?
3. Какие вы знаете разновидности солнечных элементов?
4. Назовите основные параметры солнечных элементов.
5. Назовите основные факторы, определяющие эффективность работы солнечных батарей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ИК-ПРИЕМНИКОВ И ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Цель работы – изучение работы приемников и излучателей оптических систем ИК диапазона.

Краткая теория

Инфракрасное излучение – электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света (с длиной волны $\lambda = 0,74$ мкм) и микроволновым излучением ($\lambda = 1$ мм).

Инфракрасный (ИК) излучающий диод представляет собой полупроводниковый прибор, рабочий спектр которого расположен в ближней области инфракрасного излучения – от 760 до 1400 нм. Благодаря разработке многопереходных двойных гетероструктур в системе GaAlAs было достигнуто значительное увеличение квантового выхода инфракрасных диодов. Достижение успеха в этой области обусловлено в основном внутренним квантовым выходом, эффектом электронного ограничения в активной области и эффектом многопереходности. Именно благодаря последнему направленные к нижней грани кристалла и отраженные боковыми и верхней гранями, т.е. многократно отраженные, фотоны, не будучи поглощены в активной области, вносят вклад в выводимое излучение.

Инфракрасные диоды находят применение в разнообразных устройствах, принцип работы которых основывается либо на электрическом управлении мощностью излучения диода (путем изменения прямого тока), либо на управлении коэффициентом передачи оптического канала при постоянной мощности излучения. Перспективной считается область применения ИК-диодов в качестве преобразователя энергии и источника передачи информации в узлах и линиях, требующих оптической связи или гальванической развязки. Дистанционная передача сигналов с помощью ИК-излучения имеет преимущества как перед кабельной связью (отсутствие проводов и возможных электрических наводок), так и перед высокочастотным радиоуправлением (опасность электромагнитных помех и влияние передаваемых радиосигналов на другие системы). Примером применения ИК-диода в бытовой радиоаппаратуре может служить система дистанционного управления. Для передачи команд используется принцип импульсно-кодовой модуляции инфракрасного излучения.

ИК-приемник – это в первую очередь фотодиод, рабочий спектр которого расположен в ближней области инфракрасного излучения. Обычно ИК-приемник может состоять из следующих элементов: PIN-фотодиод, усилитель, полосовой фильтр, амплитудный детектор, интегрирующий фильтр и выходной транзистор.

Описание лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы необходимо использовать электрическую принципиальную схему, представленную на рис. 16.

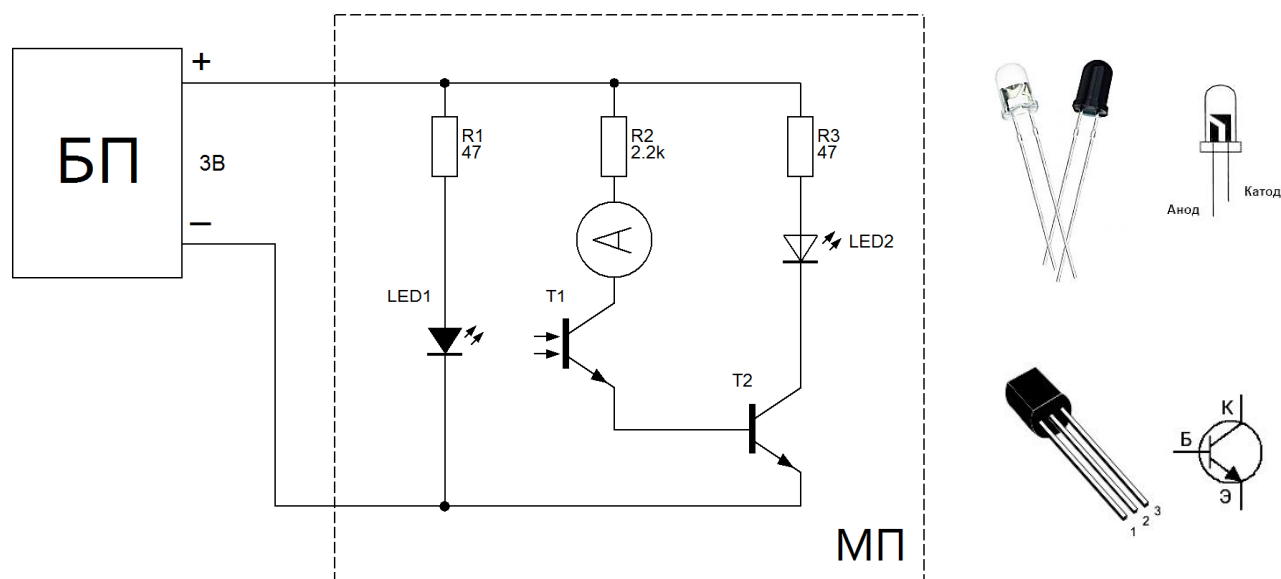


Рис. 16. Электрическая принципиальная схема для исследования работы приемников и излучателей оптических систем ИК диапазона

и цоколевка выводов диода и транзисторов:

МП – макетная плата беспаечная (выделена пунктирной линией); БП – блок питания; А – амперметр; R1, R2 и R3 – токоограничивающие резисторы (номиналы указаны на схеме); LED1 – инфракрасный светодиод IR204-A; T1 – ИК-фототранзистор PT204-6B; T2 – n-p-n-биполярный транзистор (типа С1815); LED2 – светодиод; набор соединительных проводов.

Выполнение работы

УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Собрать схему, представленную на рисунке 16.
2. Установить на выходе блока питания напряжение 3В и подключить его к собранной схеме.
3. Данная схема носит название «датчик приближения». Для ее исследования необходимо использовать экраны из разных типов материалов.
4. Поднести экран (например, лист бумаги) к паре: ИК-фототранзистор – ИК-светодиод. Если схема собрана правильно, должен засветиться светодиод LED2.
5. Измерить ток в цепи ИК-фототранзистора и расстояние от экрана до него. Отодвинуть экран на несколько сантиметров и повторить измерения. Продолжать до окончания срабатывания датчика приближения. Результаты занести в табл. 6.
6. Провести измерения для других типов экранов. Данные занести в табл. 6. Объяснить результаты.
7. Составить подробный отчет.

Таблица 6

<i>Материал экрана</i>	<i>№</i>	<i>I_{ИКТ}, мА</i>	<i>S, см</i>
Бумага	1		
	2...10		
Стекло	1		
	2...10		
...			

Контрольные вопросы

1. Назовите рабочий спектр инфракрасного излучающего диода.
2. Где используются ИК-приемники и излучатели?
3. Назовите достоинства и недостатки системы передачи информации, построенной на основе ИК-технологий.
4. За счет чего удалось увеличить энергию излучения ИК-диода?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Игнатов, А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника. Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2017. – 544 с.
2. Фомин, Д.В. Основы компьютерной электроники: учебное пособие для студентов вузов. – Саратов: Вузовское образование, 2017.– 107 с.– Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/57257>.– ЭБС «IPRbooks».
3. Самохвалов, М.К. Оптоэлектроника и индикаторная техника. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 43 с.
4. Городов, Р.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 294 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	4
Лабораторная работа № 2	8
Лабораторная работа № 3	12
Лабораторная работа № 4	17
Лабораторная работа № 5	21
Лабораторная работа № 6	27
Библиографический список	31

Дмитрий Владимирович Фомин,
директор научно-образовательного центра АмГУ,
канд. физ-мат. наук, доцент

Физические основы оптоэлектроники. Лабораторный практикум.

Изд-во АмГУ. Подписано к печати 24.09.2018. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 50. Заказ 80.