

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А.БУНИНА»

Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
для подготовки к лабораторным и практическим занятиям

Елец – 2020

УДК 621.38
ББК 32.854
К 89

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета имени И. А. Бунина
от 28. 01. 2020 г., протокол № 1

Рецензенты:

Радин С.Ю., кандидат технических наук, доцент
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина

Новиков А.В., начальник технического отдела «АйТи-Нэт»

Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров

К 89 Оптоэлектроника: учебно-методическое пособие для подготовки к лабораторным и практическим занятиям. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020. – 91 с.

Учебно-методическое пособие содержит сведения о физических принципах действия оптоэлектронной элементной базы. Рассматриваются наиболее распространенные устройства: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, светодиоды и оптроны. Практическая часть содержит указания к выполнению лабораторных работ, порядок их выполнения, правила оформления отчета, контрольные вопросы для проверки усвоенного материала.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки естественнонаучного и технического профиля.

УДК 621.38
ББК 32.854

© Елецкий государственный
университет им.И.А. Бунина, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Оптоэлектроника – синтез оптики и электроники. Она рассматривает задачи использования оптических и электрических методов обработки, передачи и хранения информации.

История оптоэлектроники ведёт своё начало с открытия оптического квантового генератора или лазера в 1960 г. В то же время (50-60-е гг.) получили достаточно широкое распространение светоизлучающие диоды, полупроводниковые фотоприёмники, устройства управления световым лучом и другие элементы оптоэлектроники.

Оптоэлектронный полупроводниковый прибор – это полупроводниковый прибор, излучающий или преобразующий электромагнитное излучение видимой, инфракрасной и (или) ультрафиолетовой области спектра или использующий подобное излучение для внутреннего взаимодействия его элементов. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы можно условно подразделить на:

- полупроводниковые излучатели,
- приемники излучения,
- оптопары.

В настоящее время оптоэлектронные полупроводниковые приборы используются практически во всех областях электроники и радиотехники.

Принципиальные отличия оптоэлектронных устройств от полупроводниковых приборов (не взаимодействующих с электромагнитным излучением) связаны с тем, что в качестве носителя информации в них наряду с носителями заряда (электронами и дырками) выступают электрически нейтральные фотоны. Этим обуславливаются их основные достоинства:

- большая информационная ёмкость оптического канала,
- узконаправленное излучение,
- возможность двойной модуляции светового луча – временная и пространственная,
- электрическая нейтральность фотонных связей,

- возможность оперирования со зрительно воспринимаемыми образами.

Эти отличительные особенности оптоэлектронных приборов открывают очень широкие возможности применения в качестве элементов связи, индикаторных приборов, различных датчиков. Таким образом, оптоэлектроника вносит свою, очень значительную, долю в комплексную микроминиатюризацию радиоэлектронной аппаратуры. Дальнейшее развитие и совершенствование средств оптоэлектроники служит техническим фундаментом разработки сверхвысокопроизводительных вычислительных комплексов, запоминающих устройств гигантской ёмкости, высокоскоростной связи, твердотельного телевидения и инфравидения.

В данной работе рассмотрены устройство и принцип действия наиболее распространённых электропреобразовательных устройств – фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов, фототиристоров и оптопар. Учебно-методическое пособие состоит из теоретической части и практической, в которой содержатся указания к выполнению лабораторных работ.

Теоретические знания, получаемые студентами в теоретической части не должны существовать сами по себе, а максимально полно должны быть использованы в его практической деятельности. Лабораторный практикум – это такая форма занятий, которая базируется практически только на самостоятельной работе студентов. Поэтому данные рекомендации призваны помочь студенту организовать свою работу. В них четко формулируется цель работы и содержание экспериментальных заданий, контрольные вопросы. Лабораторные работы способствуют формированию исследовательских навыков, навыков работы с приборами, умению обрабатывать полученные результаты. Работы сформированы так, чтобы в процессе их выполнения рассмотреть отдельный оптоэлектронный полупроводниковый прибор, изучить его с разных сторон.

Предлагаемое пособие ориентировано на студентов, обучающихся по естественнонаучным и техническим направлениям.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

Оптоэлектроника – это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, хранения и отображения информации. Физическую основу оптоэлектроники составляют процессы преобразования электрических сигналов в оптические и оптических в электрические; распространения излучения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра в различных средах; взаимодействия электромагнитных излучений оптического диапазона с веществом. Основу практически любой оптоэлектронной системы составляют генераторы когерентного и некогерентного излучения.

Генераторы когерентного излучения получили название лазеров, а большую группу источников некогерентного излучения составляют светодиоды [1-3].

Применение оптоэлектронных приборов позволяют:

- создавать каналы связи с высокой информационной емкостью,
- запоминающие устройства с высокой плотностью записи информации (10^8 бит/см²),
- близкие к идеальным элементам развязки входов и выходов устройств связи,
- устройства индикации и отображения информации,
- системы распознавания образов,
- перспективные типы интегрально-оптических устройств и систем;
- передавать электромагнитную энергию концентрированно и с малыми потерями;

- обеспечивать параллельную обработку больших объемов информации

при использовании временной и пространственной модуляции светового луча.

Спектр электромагнитных волн (рис. 1) простирается от длин волн составляющих несколько тысяч километров до космических лучей с длинами волн в триллионную часть метра.

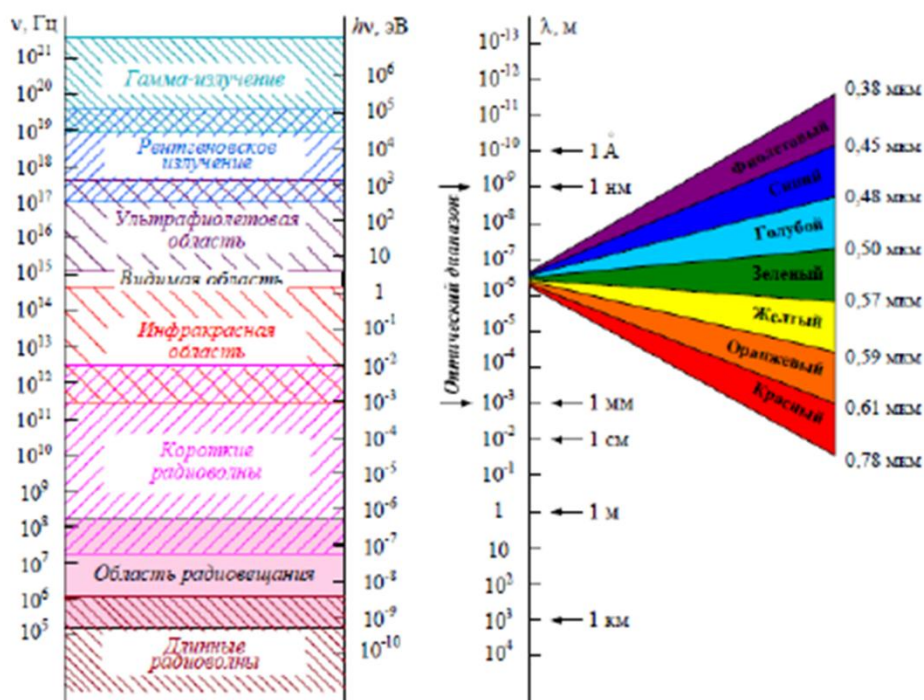


Рис. 1. Длины волн и частоты различных видов электромагнитных волн

Видимый свет определяется как излучение, которое оказывает влияние на зрительные рецепторы и включает излучение от 390 до 770 нм, т.е. от фиолетового до красного цвета, охватывая тем самым лишь малую часть электромагнитного спектра.

Использование того или иного диапазона данного спектра для передачи информации в первую очередь определяется параметрами среды распространения электромагнитных волн, в частности, показателем затухания, стабильностью постоянных распространения и др. Диапазоны частот, для которых обеспечиваются наилучшие условия распространения электромагнитных волн, но-

сят название окон прозрачности среды. По этой причине для передачи информации посредством световых волн используется не весь оптический спектр, который включает длины волн в диапазоне от 10 нм до 1 мм. В настоящее время в волоконной оптике используются длины волн приблизительно от 820 до 1650 нм, что определяется как инфракрасное излучение [1-3].

Для передачи информации по оптическому волокну недостаточно наличия самого волокна, требуются еще как минимум источник и приемник излучения, а для передачи на дальние и сверхдальние расстояния — ретрансляторы, или оптические усилители. Кроме этого, исходную информацию необходимо представить в виде оптического сигнала, что осуществляется путем модуляции источника оптического излучения, а затем восстановить ее на приемной стороне с помощью оптического приемника, включающего демодулятор. Таким образом, простейшая система передачи должна состоять из:

- модулируемого источника оптического излучения,
- оптического волокна,
- оптических ретрансляторов, или усилителей,
- оптического приемника.

Особенности оптической электроники:

1) частота электромагнитных колебаний (несущая частота) в оптическом диапазоне существенно выше, чем в радиодиапазоне. Например, частота световых колебаний в наиболее освоенной видимой и ближней инфракрасной областях спектра ($\sim 10^{13}$ – 10^{15} Гц) в миллионы раз превышает частоту радиоволн в областях радио- и телевидения. Это определяет высокую информационную емкость оптического канала связи. Так для передачи обычного телевизионного изображения требуется полоса частот $\Delta\nu = 5$ МГц. Поэтому в метровом диапазоне (при $\lambda = 1$ м, $\nu_0 = 300$ МГц) можно передать лишь около десятка телевизионных программ. В оптическом диапазоне при том же отношении $\Delta\nu/\nu_0$ это число возрастает в миллионы раз.

2) Длина световых волн существенно меньше, чем длина радиоволн. Это позволяет получить высокую концентрацию оптического излучения в пространстве, поскольку минимальный объем, в котором можно сфокусировать электромагнитное излучение, имеет характерные размеры порядка длины волны. Размеры волноводов, по которым может передаваться излучение с малыми потерями, также должны быть порядка длины волны. Поэтому оптические волноводы (световоды) при прочих равных условиях обладают существенно меньшими (на несколько порядков) размерами по сравнению с СВЧ-волноводами.

3) Передача информации осуществляется фотонами. В отличие от электронов, которые служат основными носителями информации в обычных электронных приборах, фотоны являются электрически нейтральными частицами, не взаимодействующими между собой и с внешним электрическим, и магнитным полями. Это определяет возможность идеальной гальванической развязки входа и выхода, однонаправленность потока информации, высокую помехозащищенность, исключение взаимных наводок и паразитных связей между различными элементами схемы.

4) Применение оптических методов записи, хранения и обработки информации открывает новые возможности для построения ЭВМ. Это обусловлено, с одной стороны, возможностью реализации новых принципов параллельной обработки информации (например, на основе голографических методов), а с другой – возможностью достижения высокой плотности записи информации ($\sim 10^8$ бит/см²) в оптических запоминающих устройствах [1-3].

Фотометрические величины

Основной параметр системы энергетических величин – поток излучения Φ_e – средняя мощность, переносимая оптическим излучением за время, значительно большее периода электромагнитных колебаний. Спектральный состав излучения характеризуется спектральным распределением потока излучения – функцией, описывающей зависимость монохроматического излучения $\Phi_e(\lambda)$ от длины волны (частоты) [6]. Произведение $\Phi_e(\lambda)d\lambda$ определяет мощность, переносимую потоком в интервале длин волн $d\lambda$.

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Энергетическая освещенность (облученность) E_e это отношение потока излучения $d\Phi_e$, падающего на малый элемент поверхности, к площади этого элемента dS .

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (2)$$

Сила излучения I_e это отношение потока излучения $d\Phi$ распространяющегося от источника в определенном направлении внутри малого телесного угла, к этому телесному углу $d\Omega$

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (3)$$

Энергетическая яркость излучающей поверхности в данном направлении $L_{e\theta}$ это отношение измеренной в этом направлении энергетической силы света к видимой площади излучающей поверхности

$$L_{e\theta} = \frac{I_{e\theta}}{dS_{\theta}}. \quad (4)$$

Приёмники и источники излучения

Элемент или устройство, предназначенное для приема и преобразования энергии оптического излучения в какие-либо другие виды энергии, называется приемником оптического излучения.

Физические ПИ можно разбить на четыре группы:

- тепловые;
- фотоэлектрические (на внутреннем и внешнем фотоэффекте);
- фотохимические;
- прочие, не вошедшие в первые три группы.

Тепловые приемники излучения основаны на преобразовании оптического излучения сначала в тепловую энергию, а потом в электрическую и отличаются друг от друга физическими принципами работы. Приемники излучения основанные на изменении сопротивления чувствительного элемента под действием тепла, возникающего при падении потока оптического излучения, получили название болометров, а приемники излучения, использующие термоэлектрический эффект, называются термоэлементами.

Фотоэлектрические приемники излучения делятся на две большие группы – фотоэлектрические приемники излучения на основе внутреннего фотоэффекта и фотоэлектрические приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта. В фотоэлектрических приемниках излучения падающие на приемники излучения фотоны оптического излучения прямо взаимодействуют с его кристаллической решеткой, в результате чего освобождаются носители тока. Если освобожденные носители тока остаются в полупроводнике, то наблюдается внутренний фотоэффект, который в фоторезисторах проявляется в увеличении их электропроводности (фотопроводимости). Если внутренний фотоэффект возникает в системах, состоящих из двух различных контактирующих веществ (металла и полупроводника, двух полупроводников) при освещении приконтактной области, то возникает фото – эдс. Это явление называют вентильным

фотоэффектом, а приемники излучения, основанные на этом явлении, называют вентильными фотоэлементами, или фотоэлементами с запирающим слоем. Если в качестве контактирующих веществ в вентильном фотоэлементе применить полупроводники с n- ир- проводимостью, то такой приемники излучения называют фотодиодом [1-3].

Искусственные источники оптического некогерентного излучения можно разделить на группы: тепловые, люминесцентные, газоразрядные, светодиоды. Некогерентным излучением обладают также естественные объекты. К когерентным источникам излучения относятся лазеры. Излучение этих источников лежит в широком диапазоне длин волн спектра, значительная часть которого выходит за пределы видимой области. Отличительной особенностью светоизлучающих диодов является то, что создаваемое ими излучение лежит в весьма узком спектральном диапазоне.

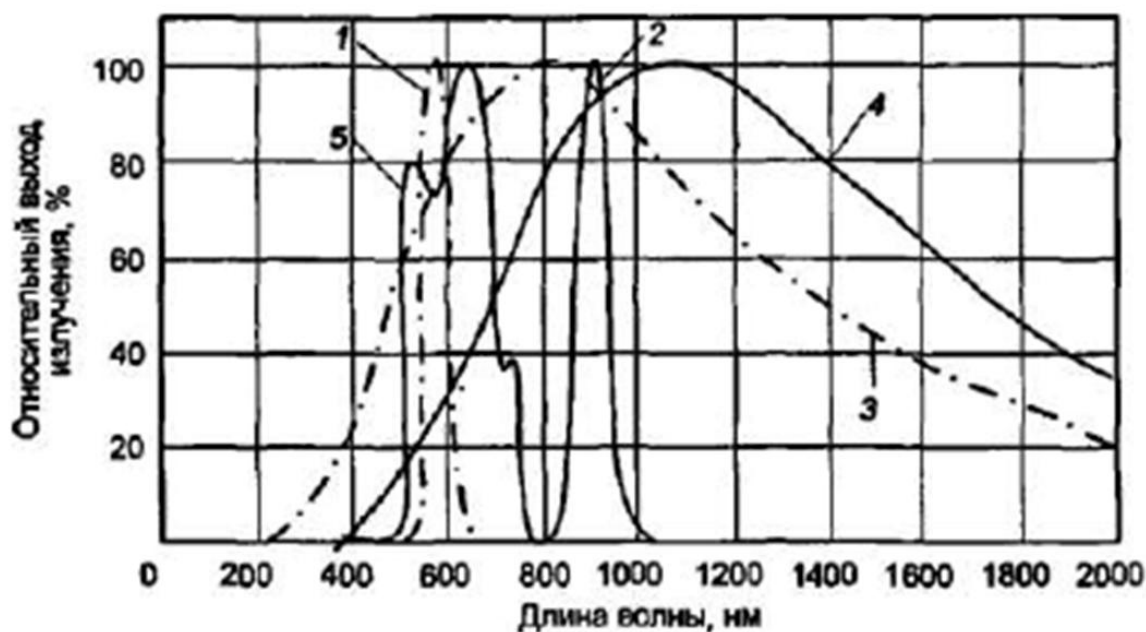


Рис. 2. Диапазоны излучения: 1,2 – соответственно зеленый, инфракрасный СИД, 3, 4 – лампы накаливания с вольфрамовой нитью, соответственно температуре 2500 К и 3400 К, 5 – неоновая лампа

К источникам излучения предъявляются следующие требования:

- высокая эффективность преобразования энергии возбуждения в энергию излучения;

- узкая спектральная полоса излучения;
- направленность излучения;
- быстродействие;
- совместимость с интегральными микросхемами и другими электронными компонентами;
- высокая технологичность и низкая стоимость;
- высокие эксплуатационные характеристики: устойчивость к механическим воздействиям и температуре, долговечность;
- миниатюрность и твёрдость.

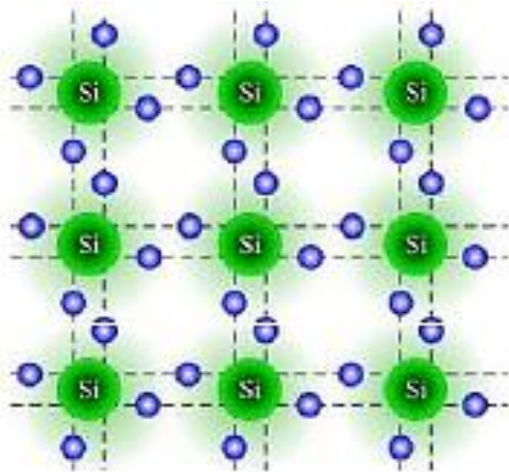
В наибольшей степени всем этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые излучающие диоды (светодиоды) и полупроводниковые инжекционные лазеры. Они в основном и находят применение в качестве источников излучения в оптоэлектронных парах. Принцип действия их основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с р-п переходом [3].

Полупроводники

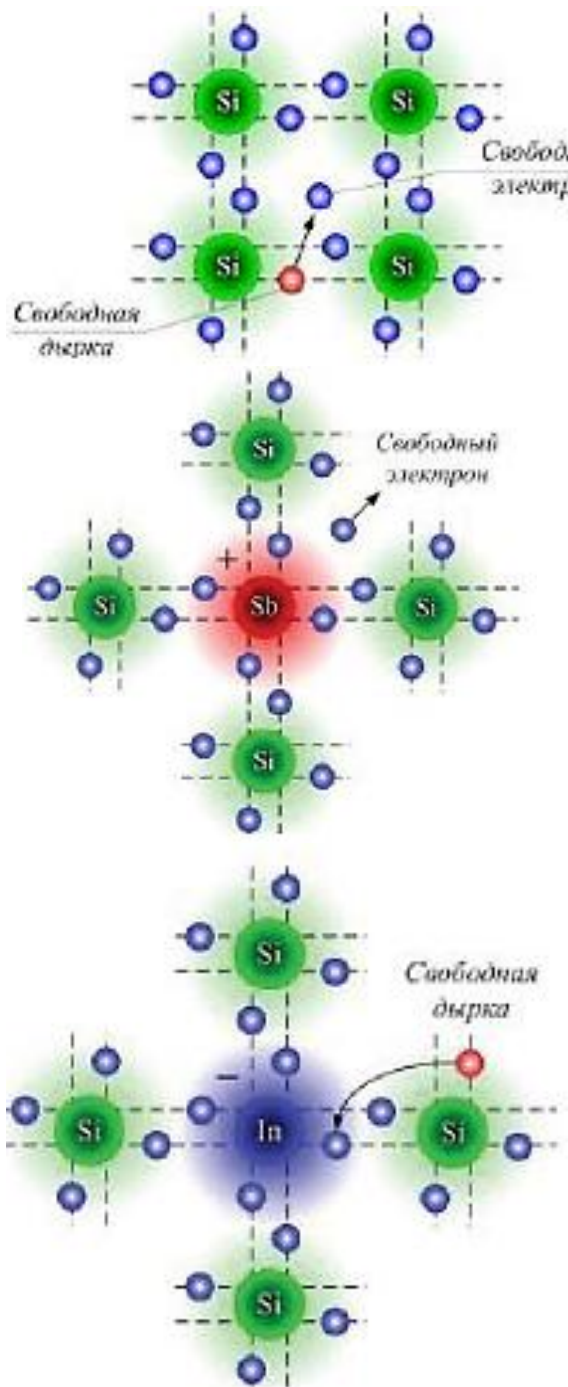
Полупроводники – это вещества, которые по величине электропроводности занимают промежуточное значение между металлами и диэлектриками. Полупроводники обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям: к изменению температуры и давления, к свету, а также к содержанию примесей. Эта особенность полупроводников дают возможность управлять их свойствами.



Рис. 3. Зонная структура полупроводников: а – собственный полупроводник, б – полупроводник n-типа, в – полупроводник p-типа. F – уровень Ферми.



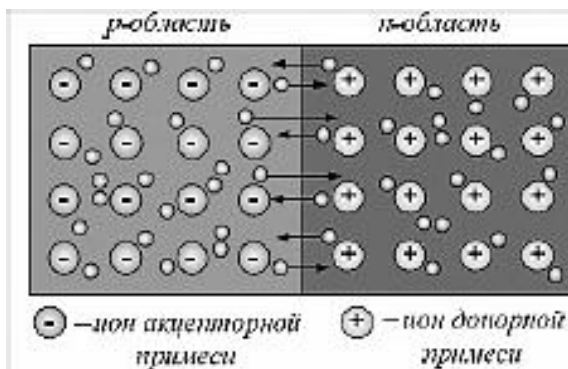
Структура связей атома кремния в кристаллической решетке: 4 валентные атомы кремния имеют по 4 прочные ковалентные связи с 4 ближайшими соседями.



Генерация пары носителей заряда «электрон-дырка»: разрыв ковалентной связи приводит к появлению отрицательно заряженного электрона и положительно заряженной дырки

Структура полупроводника с донорными примесями: 5 валентный примесный атом отдает в 1 электрон, который становится подвижным носителем заряда и сам становится неподвижным отрицательно заряженным ионом.

Структура полупроводника с акцепторными примесями: 3 валентный примесный атом забирает 1 электрон, т.е. создает в полупроводнике свободную дырку и сам становится отрицательно заряженным ионом.



Образование p-n-перехода: электроны из n-области диффундируют в p-область, где рекомбинируют с дырками (аналогично для дырок из p-области). В результате на границе раздела появляется область, обедненная подвижными носителями заряда (запирающий слой). Но остаются заряды ионов примесей, которые образуют электрическое поле потенциального барьера.

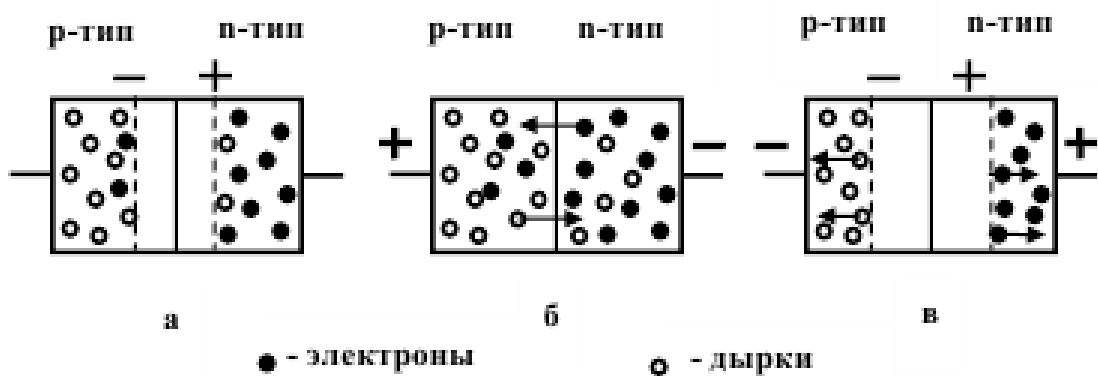


Рис. 4. Движение электронов и дырок в области р-п перехода:
 а – внешнее электрическое поле отсутствует,
 б – внешнее электрическое поле приложено в прямом направлении,
 в – внешнее электрическое поле приложено в обратном направлении.

Если направление внешнего электрического поля совпадает с направлением образовавшегося контактного поля (рис. 4), то толщина запирающего слоя значительно увеличивается, и ток через р-п переход не течёт. Такое направление внешнего электрического поля называется обратным или запирающим. Если к системе приложить внешнее электрическое поле: плюс к р-полупроводнику, а минус к п-полупроводнику, то толщина запирающего слоя уменьшается или становится равной нулю. В этом случае через р-п переход потечёт ток. Такое направление внешнего электрического поля называется прямым. При этом основные носители р области – дырки начинают двигаться навстречу основным носителям п области – электронам. На границе р и п областей они рекомбинируют. Процесс рекомбинации означает переход электронов с более высоких энергетических уровней зоны проводимости на более низкие энергетические уровни валентной зоны. Такие переходы сопровождаются выделением энергии. Энергия может выделяться в виде светового кванта – фотона или передаваться в виде тепла (фонона) кристаллической решётке, – излучательная и безизлучательная рекомбинация.

Выделяющаяся энергия при этом почти равна ширине запрещённой зоны ΔW . Длина волны излучаемого светового кванта при этом равна

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W}. \quad (5)$$

Удобно записать ширину запрещённой зоны в электрон-вольтах, тогда

$\lambda = 1,23/\Delta W$. Из этого выражения следует, что для получения видимого излучения с длиной волны $\lambda = 0,38 \dots 0,78$ мкм полупроводник должен иметь $\Delta W > 1,7$ эВ.

Физические принципы работы полупроводниковых приёмников излучения

Приемники излучения на основе использования внутреннего фотоэффекта базируются на взаимодействии падающих квантов излучения с кристаллической решеткой полупроводников различного типа, в результате которого происходит ионизация атомов кристаллической решетки с образованием свободных носителей зарядов – электронов и дырок. Это приводит к изменению электропроводности (проводимости) полупроводника.

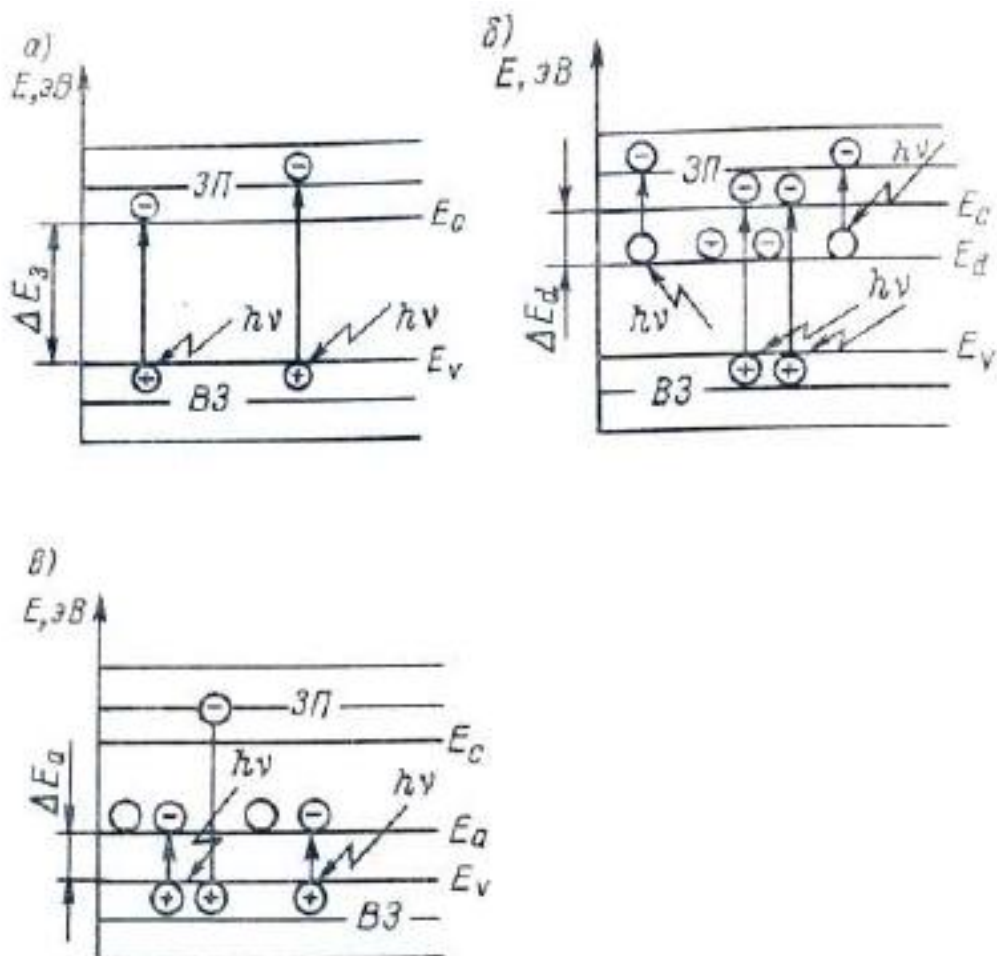


Рис. 5. Поглощение кванта света. а – собственный полупроводник, б – донорный, в – акцепторный.

E_V – максимальная энергия, которой могут обладать электроны чистого полупроводника в связанном состоянии. Все электроны, энергия которых ниже E_V связаны с атомами и находятся в так называемой валентной зоне.

E_c - минимальная энергия, которую может иметь свободный электрон. Выше E_c лежат возможные значения энергии свободных электронов, образующих свободную зону, или зону проводимости. Для того чтобы перевести электрон из связанного состояния в свободное, падающие кванты должны сообщить ему энергии больше, чем $E_g = E_c - E_v$. Энергия E_g называется шириной запрещенной зоны полупроводника и определяется природой его химических связей (например, E_g для германия 0,63 эВ, для кремния 1,12 эВ).

В чистом (собственном) полупроводнике падающие кванты освобождают пару электрон-дырка (рис. 5а). При этом часть энергии переходит в тепло в виде тепловых квантов—фононов. На энергетической диаграмме наличие примеси в решетке полупроводника будет характеризоваться появлением локального уровня примеси, лежащего в запрещенной зоне (рис. 5 б, в). Переходы электронов из связанного состояния в свободное могут происходить из-за их теплового движения, что обуславливает тепловую проводимость полупроводника, или из-за поглощения квантов потока излучения, что сопровождается появлением фотопроводимости.

Фотопроводимость может возникнуть, если энергия падающего кванта ($h\nu$) достаточна для сообщения электрону энергии для преодоления запрещенной зоны: $h\nu > \Delta E_g$.

Для примесных полупроводников (рис. 5 б, в)

$$h\nu > \Delta E_a \text{ или } h\nu > \Delta E_d.$$

Из этих выражений следует, что длинноволновая граница спектральной чувствительности полупроводниковых приемников на внутреннем фотоэффекте

$$\lambda' = \frac{hc}{\Delta E_g} = \frac{1,242}{\Delta E_g}$$

где λ' – предельная длина волны монохроматического излучения, при которой возникает внутренний фотоэффект.

Фоторезистор

Фоторезистором называется приемник излучения, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости. Под действием потока излучения вследствие внутреннего фотоэффекта у фоторезистора меняется сопротивление.

Фоторезисторы представляют собой пленки или пластинки фоточувствительного полупроводникового материала, снабженные двумя невыпрямляющими контактами для включения их в электрическую цепь. Фоторезисторы имеют линейную вольт-амперную и нелинейную энергетическую характеристику, рис. 6.

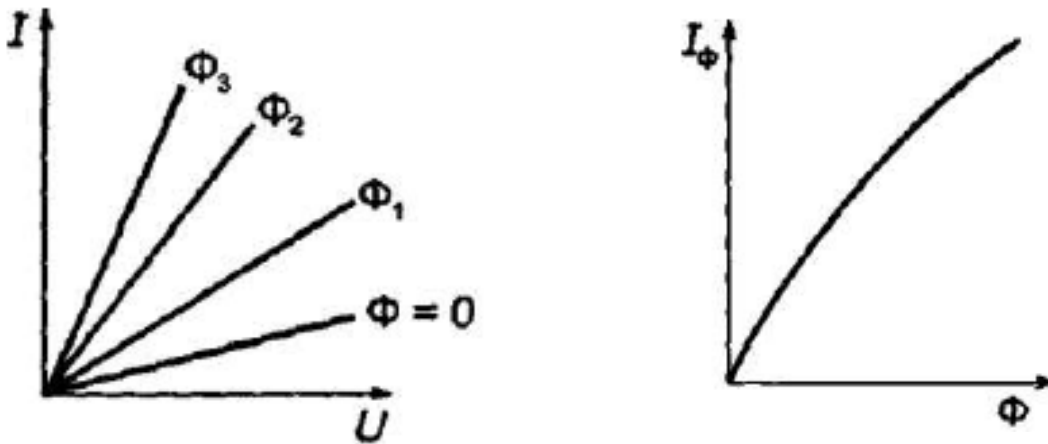


Рис.6. Вольт-амперная и энергетическая характеристика фоторезистора

Спектральная характеристика фоторезистора – зависимость фототока от длины волны падающего света. Для каждого фоторезистора существует свой максимум спектральной характеристики S_{\max} . Это связано с различной шириной запрещенной зоны используемых материалов. Максимум спектральной характеристики может находиться в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой частях спектра. К параметрам фоторезисторов кроме темнового сопротивления и удельной чувствительности следует еще отнести максимальное допустимое рабочее напряжение (до 600 В), кратность

изменения сопротивления (может быть до 500), температурный коэффициент фототока

$$\text{ТКФ} = \frac{\Delta I}{I \cdot \Delta T} \quad (6)$$

Значительная зависимость сопротивления от температуры характерная для полупроводников, является недостатком фоторезисторов. Существенным недостатком надо считать также их большую инерционность, объясняющуюся довольно большим временем рекомбинации электронов и дырок после прекращения облучения. Практически фоторезисторы применяются лишь на частотах не выше нескольких сотен герц или единиц килогерц. Собственные шумы фоторезисторов значительны. Тем не менее, фоторезисторы широко применяются в различных схемах автоматики и во многих других устройствах. Допустимая мощность рассеяния фоторезисторов зависит от материала чувствительного слоя, а также от режима облучения. При непрерывном облучении эта мощность находится в пределах от сотых до десятых долей ватта, при импульсном облучении она достигает единиц ватт. К числу основных шумов, определяющих порог чувствительности фоторезисторов, относятся тепловой и токовый шумы. Предел уменьшения порогового потока ограничивается радиационным шумом.

К достоинствам фоторезисторов относят: как малые размеры и массу, пониженное по сравнению с фотоэмиссионными приемниками напряжение питания, возможность работы в значительно более широком спектральном диапазоне. Ряд фоторезисторов имеет очень высокую интегральную чувствительность, мощность их рассеяния достаточна для управления электрической цепью мощностью в несколько ватт.

К недостаткам фотоприемников этого класса можно отнести повышенную инерционность, значительную зависимость характеристик и параметров от температуры, малую линейную зону энергетической характеристики, зависимость выходного сигнала от площади засветки чувствительного слоя.

Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электропроводные электроды Э (рис. 7).

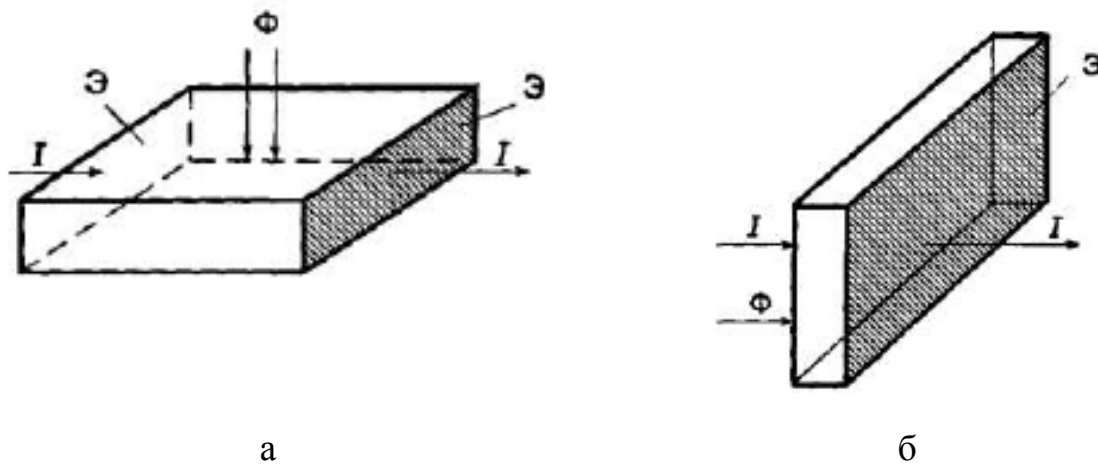


Рис. 7. Поперечный (а) и продольный (б) фоторезистор

Принципиально возможны две конструкции фоторезисторов: поперечная и продольная. В первом случае электрическое поле, прикладываемое к фоторезистору, и возбуждающий свет действуют во взаимно перпендикулярных плоскостях, во втором – в одной плоскости. Очевидно, что в продольном фоторезисторе возбуждение осуществляется через электрод, прозрачный для этого излучения. Поперечный фоторезистор представляет собой почти омическое сопротивление до частот порядка десятков и сотен мегагерц. Продольный фоторезистор из-за конструктивных особенностей имеет значительную геометрическую емкость, которая не позволяет считать фоторезистор чисто омическим сопротивлением на частотах уже в сотни – тысячи герц.

В качестве исходного материала фоторезисторов чаще всего используют сернистый таллий, селенистый теллур, сернистый висмут, сернистый свинец, теллуристый свинец, сернистый кадмий и т.д [1-3].

Фоторезисторы активно используются в следующих устройствах:

1. Фотореле. Устройства, которые предназначены для автоматического включения отключения систем освещения без активного вмешательства человека.

2. Датчики освещенности. В таких устройствах фоторезисторы выполняют функцию регистратора светового потока.

3. Сигнализация. В сигнализационных системах применяются фоторезисторы чувствительные ультрафиолетовым волнам. Принцип таков фоторезистор постоянно освещается источником ультрафиолетового излучения и как только между источником и приемником возникает препятствие – срабатывает сигнализация.

Фотодиод

Фотодиодом принято называть полупроводниковый приемник излучения, основанный на использовании односторонней проводимости р - n перехода, при освещении которого или образуется ЭДС (фотогальванический, или вентильный режим), или при наличии источника питания в цепи фотодиода изменяется его обратный ток (фотодиодный режим). Упрощенная структура фотодиода: представляет собой обратно-смещенный р-n-переход. Важными свойствами такого перехода является наличие обедненной носителями области перехода, концентрирующей относительно сильное поле, и области поглощения, где поглощается падающий свет (захватываются фотоны).

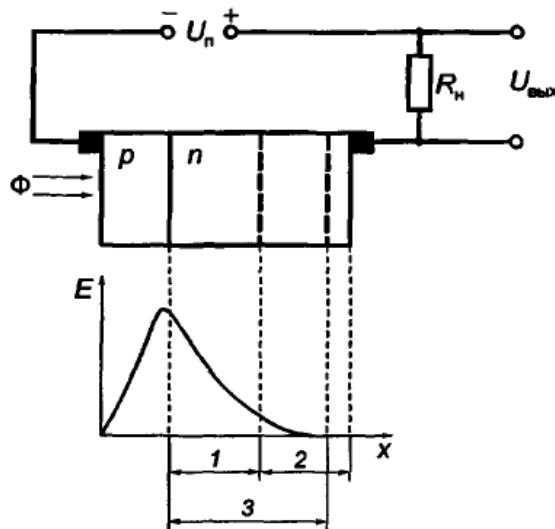


Рис. 7. Структура фотодиода и распределение электрического поля в структуре. 1 – обедненная область; 2 – диффузионная область; 3 – область поглощения; E – напряженность электрического поля.

Обедненная область образуется неподвижными положительно заряженными атомами доноров в n-области и неподвижными отрицательно заряженными атомами акцепторов в р-области. Ширина обедненной области зависит от концентрации легирующих примесей. Чем меньше примесей, тем шире обедненный слой. Положение и ширина поглощающей области зависят от длины волны падающего света и от материала, из которого сделан диод. Чем сильнее поглощается свет, тем тоньше поглощающая область. Эта область может распространяться полностью на весь диод, если свет поглощается

слабо. Когда поглощаются фотоны, электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости. Так создается электронно-дырочная пара. Если такая пара создается в обедненной области, то носители будут разделяться (дрейфовать) под влиянием поля в обедненной области. В результате в цепи нагрузки потечет ток. Если электронно-дырочная пара образуется вне обедненной области, то дырка будет диффундировать в сторону обедненной области. Так как диффузия по сравнению с дрейфом происходит очень медленно, желательно, чтобы большая часть света поглощалась в обедненной области. Таким образом, желательно сделать обедненную область протяженной, уменьшая концентрацию легирующей примеси в n-слое. Это требует такого слабого легирования n-слоя, что его можно считать собственным. Под воздействием светового потока на электронно-дырочный переход и прилегающие к нему области происходит генерация пар носителей заряда, проводимость диода возрастает и обратный ток увеличивается. Добавка к обратному току, связанная с освещением, называется фототоком I_{ϕ} . Полная величина обратного тока: $I_{\text{обр}} = I_{\text{T}} + I_{\phi}$, где I_{T} - темновой ток (при нулевом световом потоке $\Phi = 0$), т.е. это обратный ток обычного диода.

Фототок обычно представляют выражением $I_{\phi} = S_{\text{инт}} \Phi$, а коэффициент пропорциональности $S_{\text{инт}}$ называют интегральной токовой чувствительностью фотодиода. Интегральная чувствительность обычно составляет десятки миллиампер на люмен. Она зависит от длины волны световых лучей и имеет максимум при некоторой длине волны, различной для разных полупроводников.

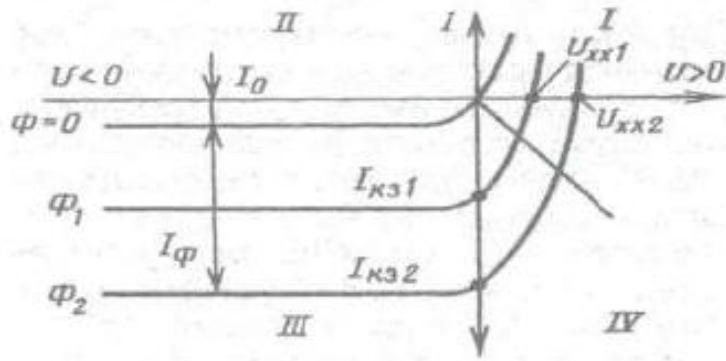


Рис. 8. Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода

Участок I (рис. 8) соответствует фотодиффузионной области. Здесь р-п-переходу прикладывается прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок, что делает невозможным управление фототоком. Подобный режим работы, как правило не используется. Участок III (рис. 8) соответствует фотодиодному режиму работы. При отсутствии засветки фотодиода ($\Phi=0$) через него протекает темновой ток, который описывается уравнением

$$I_T = I_0 \left(\exp \left(\frac{U}{\varphi_T} \right) - 1 \right), \quad (7)$$

где $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ – температурный (тепловой) потенциал.

При засветке фотодиода ($\Phi \neq 0$) получаем семейство вольт-амперных характеристик, которое описывается уравнением

$$I_{\text{обр}} = I_T + I_\Phi = I_0 \left(\exp \left(\frac{U}{\varphi_T} \right) - 1 \right) + S_{\text{инт}} \Phi \quad (8)$$

В рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от сопротивления нагрузки, сопротивление диода постоянному току изменяется в больших пределах при изменениях светового потока, поэтому иногда вместо термина «фотодиодный режим» используется термин «фоторезисторный режим». Сопротивление фотодиода переменному току на рассматриваемом участке велико и имеет тенденцию к уменьшению при больших значениях светового потока.

Участок IV (рис. 8) соответствует фотогальваническому режиму работы. В этом режиме фотодиод является генератором тока и на сопротивлении нагрузки возникает напряжение. Если $R_H = 0$ (режим короткого замыкания), то в цепи течет так называемый фототок короткого замыкания $I_{кз}$.

Фотодиоды изготавливают на основе:

- одного p-n-перехода, сформированного на границе двух областей из одного материала с соответствующими примесями противоположного типа;
- гетероперехода, образующегося на границе двух областей различных материалов с примесями противоположного типа;
- контактного барьера, возникающего на границе металл – n - полупроводник и металл – p - полупроводник;
- различных МДП-структур (барьера Шоттки) и ряда других схем.

В настоящее время основными материалами для изготовления фотодиодов служат германий, кремний, а также сурьмянистый индий и арсенид галлия.

Постоянная времени фотодиода (период, в ходе которого ток реагирует на увеличение затемнения или освещенности на 63% от установленного значения) в значительной степени зависит от способа его изготовления, от размеров площадки. Для сплавных фотодиодов значение τ обычно близко к 10^{-5} с; для диффузионных фотодиодов при маленьких площадках τ может достигать 10^{-6} с. В специальных фотодиодах с малой толщиной базы можно достигнуть $\tau = 10^{-10}$ с [1-3].

Фотодиоды применяются в:

- а) оптоэлектронных интегральных микросхемах,
- б) многоэлементных фотоприемниках,
- в) оптронах.

Стремление увеличить чувствительность фотодиодов и уменьшить их постоянную времени привело к разработке p-i-n-фотодиодов. Типичный p-i-n - фотодиод состоит из трех последовательных областей (рис. 9): из тонкой сильно легированной n-области, более толстого слоя с очень малой концентрацией примеси (i-область) и сильно легированной p-области.

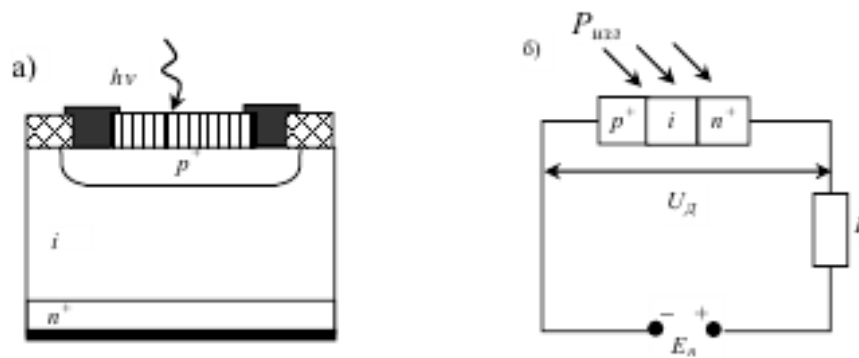


Рис. 9. p-i-n-фотодиод

Квантовая эффективность таких диодов обычно достигает 80 %. Для диодов, сконструированных для применения в оптоволоконных линиях емкость перехода равна 0,2 пФ, при рабочей поверхности диода 200 мкм. Основное преимущество p-i-n фотодиода заключается в высоких скоростях переключения, так как поглощение излучения происходит в i-слое, где за счет дрейфового переноса реализуются высокие скорости для носителей заряда. Другим преимуществом является высокая квантовая эффективность, поскольку толщина i-слоя обычно больше обратного коэффициента поглощения и все фотоны поглощаются в i-слое. Использование гетеропереходов для p-i-n фотодиодов позволяет избежать поглощения света в базе фотодиода. В результате освобождения i-области от носителей под воздействием обратного смещения в ней устанавливается сильное и почти постоянное поле. Падающее излучение поглощается в i- и n-областях и образует электронно-дырочные пары. Электроны и дырки разделяются полем и покидают i-область, а пары, возникающие в n-области, диффундируют к переходу, где дырки захватываются сильным ускоряющим электрическим полем и проходят через переход, а электроны остаются в n-области.

Одним из путей создания быстродействующих фотоприемников с высокой чувствительностью является использование лавинного пробоя, в частности, создание лавинных фотодиодов. Если поле в активной зоне фотодиода велико и энергия, приобретаемая фотоносителями тока

(электронами и дырками) в этом поле, превышает энергию образования. В фотодиодах усиление тока можно получить умножением числа носителей. На этом принципе основаны лавинные фотодиоды, в которых при обратном напряжении, равном или близком к пробивному, в области р - n - перехода подвижные носители приобретают столь высокие скорости, что вызывают ионизацию атомов решетки, т. е. образуют новые электронно-дырочные пары. Это же ускорение действует и на носители, появившиеся в области р-п-перехода при его освещении. Коэффициент умножения M определяется по формуле

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_D}{U_{пр}}\right)^n}, \quad (9)$$

где U_D - напряжение внешнего обратного смещения, $U_{пр}$ - напряжение обратного смещения, при котором наступает электрический пробой фотодиода - обычно это напряжение порядка 100 В, но может достигать в некоторых устройствах нескольких сот вольт, n - число в диапазоне от 3 до 6.

Среди других полупроводниковых приемников излучения, созданных за последнее время, можно отметить фотодиоды с барьером Шоттки, характеризующиеся сравнительно простой технологией изготовления, параметры которых близки к параметрам р-і-п - фотодиодов, а также гетерофотодиоды. Сравнительно большие темновые токи при включении обычных фотодиодов в фотодиодном режиме делают невозможным их использование для измерения малых потоков. В этом случае необходимо работать в фотогальваническом режиме, при котором обнаружительная способность системы определяется практически не весьма малыми шумами приемника, а шумами схемы его включения или последующих электронных звеньев.

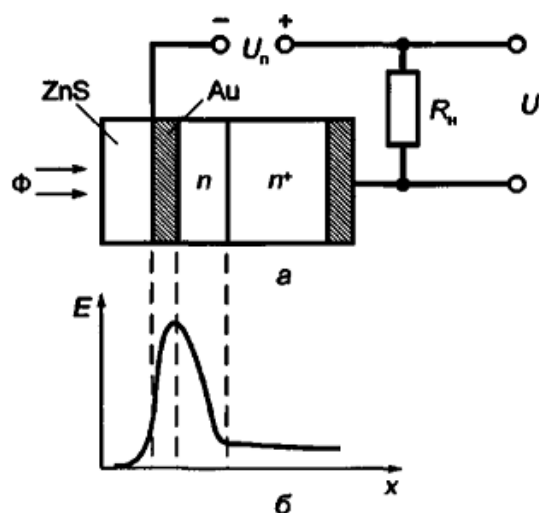


Рис. 10. Структура фотодиод с барьером Шоттки и распределение поля в структуре.

При отсутствии внешнего напряжения и оптического излучения переход находится в равновесном состоянии. Это состояние характеризуется равновесным поверхностным потенциалом $U_{пов0}$. Потенциальный барьер в приконтактном слое называют барьером Шоттки. Его высота $U_{пов0}$ является аналогом внутреннего потенциального барьера в p-n-переходе. В зависимости от полярности приложенного внешнего напряжения высота барьера Шоттки и сопротивление приконтактного слоя будут меняться. При приложении прямого напряжения $U_{пр}$ положительный полюс к металлу, отрицательный – к полупроводнику n-типа, потенциальный барьер понижается, приконтактный слой обогащается основными носителями – электронами, и сопротивление перехода «металл-полупроводник» будет меньше равновесного. Если изменить полярность внешнего напряжения, т.е. приложить к переходу обратное напряжение $U_{обр}$, то потенциальный барьер в контакте повышается. В этом случае приконтактный слой еще сильнее обедняется основными носителями – электронами и повышается его сопротивление по сравнению с равновесным состоянием. Таким образом, контакт «металл-полупроводник» обладает выпрямляющими свойствами и может быть основой приборов, называемых диодами Шоттки.

В фотодиодах с барьером Шоттки имеется возможность поглощения квантов излучения в металле контакта (если энергия квантов излучения меньше ширины запрещенной зоны). Если энергия кванта излучения больше высоты потенциального барьера, то возбужденные электроны из металла могут перейти в полупроводник через потенциальный барьер. В результате длинноволновая граница спектральной характеристики фотодиода сдвигается в сторону более длинных волн.

Перспективность применения фотодиодов Шоттки в оптоэлектронике объясняется их следующими достоинствами:

- малым сопротивлением базы фотодиода r_b ; поэтому постоянная времени барьерной емкости у фотодиодов Шоттки примерно равна 10^{-12} с, а инерционность определяется только временем пролета фотоносителей через область объемного заряда ($10^{-11} \dots 10^{-12}$)с;

- сочетанием высокого быстродействия и высокой чувствительности ($S = 0,5$ А/Вт);

- простотой создания выпрямляющих фоточувствительных структур на самых разнообразных металлах и полупроводниках и, следовательно, возможностью управления высотой потенциального барьера Шоттки; в частности, кремневые фотодиоды с барьером Шоттки работают при $\lambda = 0,63$ мкм, имеют быстродействие 10^{-10} с и фоточувствительность $S = 0,5$ А/Вт;

- хорошей совместимостью с оптическими интегральными микросхемами.

Фототранзистор

Фототранзистором называют полупроводниковый приемник излучения на основе использования внутреннего фотоэффекта, совмещающий в себе свойства фотодиода и усилительного триода. Различают униполярные и биполярные фототранзисторы. Униполярные фототранзисторы создаются на основе МДП-структур. Различают два их типа: в первом ток обусловлен электронами, и его называют *n*-канальным; во втором – дырками, и его называют *p*-канальным. Наиболее распространены *p*-канальные униполярные фототранзисторы.

Биполярным фототранзистором называют полупроводниковый приемник излучения на основе использования внутреннего фотоэффекта с двумя *p-n*-переходами и с дополнительным усилением фототока на втором *p-n*-переходе. Такой фототранзистор состоит из монокристалла германия *n*-типа – базы, в котором с двух сторон созданы сплавные *p-n* – переходы – коллекторный и эмиттерный. Значительный эффект усиления фототока фототранзистора наблюдается при его включении с «оборванной» базой, при этом на эмиттерный переход подается напряжение в прямом, а на коллекторный – в запирающем направлении. Входным сигналом для фототранзистора (в отличие от обычного транзистора) служит падающий поток излучения Φ (рис. 11), который и управляет током в цепи. Когда фототранзистор не освещен, через него протекает ток, определяемый неосновными носителями, инжектированными из эмиттера, прошедшими базу и достигшими коллектора. Несмотря на то что переход база – эмиттер включен в прямом направлении, число дырок, инжектированных эмиттером на базу, невелико, а сам ток фактически мал. Объясняется это тем, что дырки накапливаются в базе вследствие отсутствия контактирующих отрицательных зарядов, которые не могут туда поступать из-за ее обрыва.

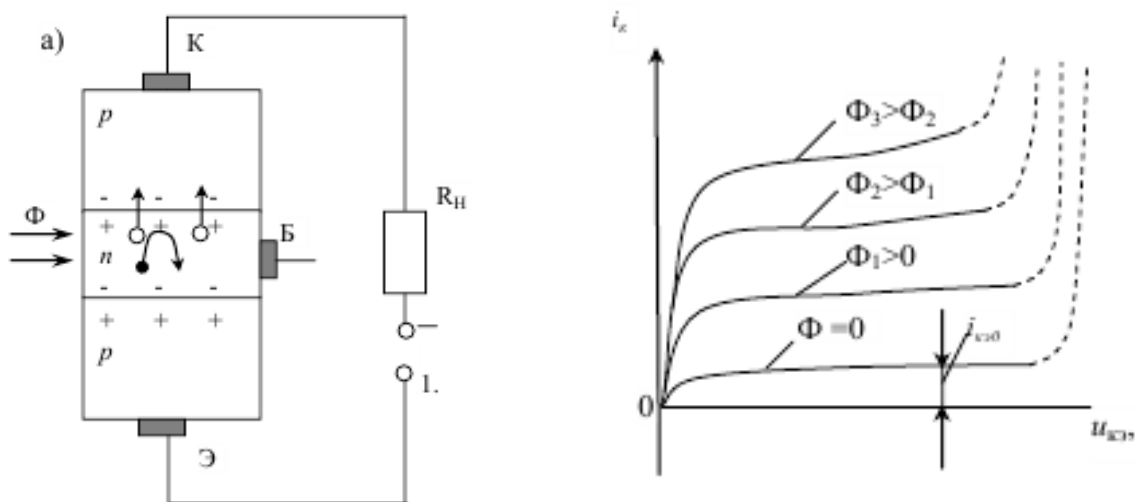


Рис. 11. Структура фототранзистора со «свободной» базой и его выходные характеристики

При облучении образующиеся дырки диффундируют к эмиттеру и коллектору. Дырки, пришедшие к коллектору, увеличивают его ток, а электроны создают избыточный нескомпенсированный отрицательный объемный заряд, уменьшающий потенциальный барьер перехода эмиттер-база и резко увеличивающий поток дырок из эмиттера в область базы. Эти дырки, пройдя базовую область, попадают на коллектор и еще больше увеличивают ток фототранзистора, причем ток за счет дырок, вызванных отрицательным объемным зарядом в области базы, превосходит значение тока, определяемого дырками, генерированными в базе первоначально под действием света. Таким образом, усиливается фототок. Если есть базовый вывод, его можно использовать для выбора начального режима и стабилизации рабочей точки фототранзистора при изменении окружающей температуры. Благодаря усилению фототока интегральная чувствительность фототранзистора выше, чем у фотодиода, и достигает 0,2-0,5 А/млм. Вольтовая чувствительность фототранзистора немного выше, чем у фотодиода (а иногда и ниже), так как темновой ток фотодиода больше, а рабочее напряжение питания меньше.

Известно, что коллекторный ток I_k при $I_b = 0$ (базаотключена) в $(\beta+1)$ раз больше, чем $I_{к60}$ (при $I_s=0$). В этом случае через транзистор идет сквозной

коллекторный ток $I_{кэ0} \approx \beta \cdot I_{кб0}$. Следовательно, ток фототранзистора при $I_b = 0$ и обратном включении коллекторного перехода будет равен $I_{кэ0} = \beta \cdot (I_{кб0} + I_\Phi)$, где $\beta \cdot I_{кб0}$ - темновой ток фототранзистора, $\beta \cdot I_\Phi = \beta \cdot K_\Phi \cdot \Phi$ - световой ток фототранзистора, K_Φ - интегральная фоточувствительность фототранзистора, которая в β раз больше, чем у фотодиода, при прочих равных условиях.

Вольт-амперные характеристики фототранзистора аналогичны фотодиодным. Они имеют меньшее внутреннее сопротивление, и их характеристики обладают большей крутизной, чем у фотодиода. Световые характеристики фототранзистора линейны в широком диапазоне. По постоянной времени и частотным характеристикам фототранзисторы уступают фотодиодам, так как эмиттерный переход имеет большую емкость (примерно 10^5 пФ/см²), что увеличивает постоянную времени схемной релаксации (постоянная времени фототранзистора 10^{-4} - 10^{-6} с). Фототранзистор является приемником излучения и одновременно усилителем фототока. Значительно выше по сравнению с фотодиодами интегральная чувствительность у фототранзисторов.

Недостаток фототранзисторов - сравнительно высокий уровень собственных шумов и невысокое быстродействие по сравнению с фотодиодами. У фототранзистора можно дополнительно использовать вывод базы для электрического управления фототранзистором, например для компенсации посторонних внешних воздействий. Кроме схемы включения с оборванной базой, рассмотренной выше, для фототранзистора разработаны специальные схемы включения, учитывающие необходимую стабильность его работы при изменении температуры окружающей среды. Повышения стабильности работы фототранзистора добиваются применением компенсирующих элементов и отрицательной обратной связи по переменному току.

В качестве приемников излучения используются полевые транзисторы с управляющим p-n -переходом или МДП-транзисторы.

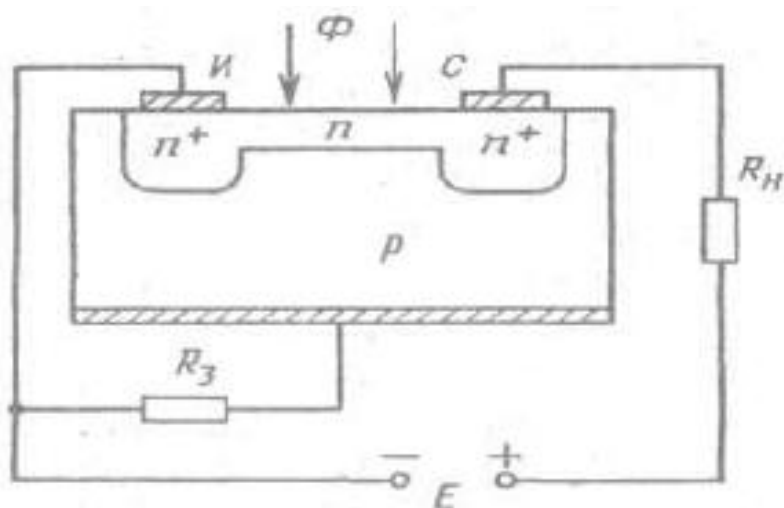


Рис. 12. Полевой фототранзистор с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа.

Такие фототранзисторы по сравнению с обычными имеют три электрода: исток, сток и затвор. Между истоком и стоком образуется фоторезистивный проводящий канал, сопротивление которого изменяется при его облучении и зависит также от потенциала затвора. Управление током стока в этом транзисторе осуществляется с помощью света. Световой поток генерирует носители заряда в области затвора и перехода затвор - канал. Электрическое поле этого перехода разделяет носители заряда. Концентрация электронов в канале увеличивается, сопротивление канала уменьшается, ток стока возрастает. Концентрация дырок в области затвора также возрастает. Возникает фототок в цепи затвора, который создает падение напряжения на сопротивлении. Обратное напряжение на переходе канал - затвор уменьшается, ширина его также уменьшается, что приводит к увеличению ширины канала и дополнительному увеличению тока стока. К недостаткам полевого фототранзистора относят нелинейность его энергетических характеристик, так как при больших уровнях потока излучения потенциал затвора становится столь малым, что его изменение уже не влияет на ток стока, который близок к максимальному значению. Полевые фототранзисторы имеют постоянную времени $\sim 10^{-7}$ с, определяемую инерционностью цепи затвора и временем пролета носителей через канал. В фототранзисторах типа МДП с

индуцированным каналом за счет теплового воздействия удастся изменять значение порогового напряжения и крутизну транзистора.

Фототранзисторы используют в качестве ключевых приемников видимой и ближней ИК области спектра, а также в оптопарах (узлы запуска тиристоры, мультивибраторы, генераторы колебаний сложной формы и т. п.). Фототранзисторы имеют, как правило, слаботочное исполнение, так как от них требуется высокое быстродействие и регистрация слабых световых потоков. Поэтому их используют совместно с усилительными или ключевыми каскадами.

Фототиристор

Фототиристором называют фотоэлектрический полупроводниковый прибор р-п-р-п-структуры с тремя р-п-переходами, при освещении которого прибор переводится из закрытого состояния в открытое в прямом направлении.

Схема работы фототиристора аналогична схеме работы обычного тиристора с той лишь разницей, что управляющей величиной является не ток, а световой поток. Фототиристор представляет собой аналог управляемого тиристора, но переключение его в открытое состояние производится световым импульсом.

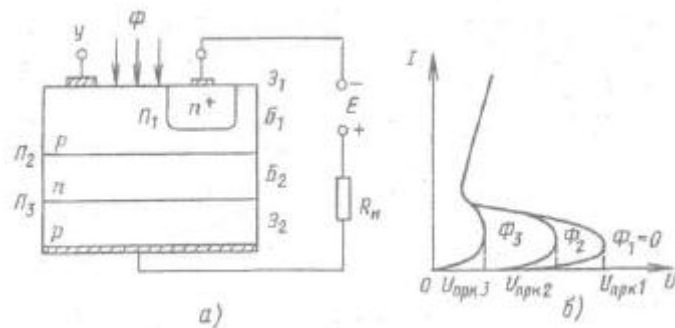


Рис. 13. Структура фототиристора и его вольт-амперная характеристика

Переключение фототиристора из закрытого состояния в открытое происходит, так же как у обычного тиристора. При действии света на область базы p_1 в этой области генерируются электроны и дырки, которые диффундируют к р-п - переходам. Электроны, попадая в область перехода Π_2 находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. За счет этого происходит перераспределение напряжения, приложенного к тиристор; напряжение на переходе Π_2 несколько уменьшается, а напряжения на переходах Π_1 и Π_3 несколько увеличиваются. Но тогда усиливается инжекция в переходах Π_1 и Π_3 . К переходу Π_2 приходят инжектированные носители, его сопротивление снова уменьшается и происходит дополнительное перераспределение напряжения, еще больше усиливается инжекция в переходах Π_1 и Π_3 ток лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой поток, действующий на фототиристор, тем при меньшем

напряжении он включается. Это наглядно показывают вольт-амперные характеристики фототиристора (рис. 13). После включения на тиристоре устанавливается, как обычно, небольшое напряжение и почти все напряжение источника E падает на нагрузке. Иногда у фототиристора бывает сделан вывод от одной из базовых областей. Если через этот вывод подавать на соответствующий эмиттерный переход прямое напряжение, то можно понижать напряжение включения. Само включение по-прежнему будет осуществляться действием светового потока.

Благодаря особенностям р-п-р-п-структуры фототиристоры имеют некоторые преимущества перед фотодиодами и фототранзисторами:

- в схемах, преобразующих падающий поток излучения в электрический сигнал (в фотореле, логических схемах и т. д.): область рабочих напряжений фототиристоров на порядок выше фотодиодов и фототранзисторов;

- предельно допустимый ток фототиристора и его интегральная чувствительность в 3-4 раза выше, чем у фототранзисторов;

- постоянная времени фототиристора сравнима с фотодиодами и меньше, чем у фототранзисторов;

- диапазон рабочих температур сравним с кремниевым фотодиодом, а наличие управляющего электрода позволяет осуществлять температурную компенсацию[1-3].

Фототиристоры используют для прямого оптического управления мощными электрическими устройствами в цепях постоянного и переменного токов как оптоэлектронные ключи. В низковольтных преобразователях малой мощности фототиристоры можно использовать для непосредственной коммутации нагрузки.

Светодиоды

Светодиод является полупроводниковым излучающим прибором с одним или несколькими p-n переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

Излучение возникает в результате рекомбинации инжектированных носителей в одной из областей, прилегающих к p-n переходу. По характеристике излучения светодиоды можно разделить на две группы:

- светодиоды с излучением в видимой части спектра;
- светодиоды с излучением в инфракрасной части диапазона.

Основные параметры светодиодов следующие:

1. Постоянное прямое напряжение. Оно зависит от длины волны излучения светодиода и составляет $\sim 1.4\text{В}$ для 0.9 мкм , $\sim 1.7\text{В}$ для красного излучения, $\sim 2.3\text{В}$ для зелёного, $\sim 3.3\text{--}3.6\text{В}$ для белого, синего и не зависит от протекающего тока.

2. Цвет свечения и длина волны, соответствующие максимальному световому потоку.

3. Максимальный допустимый постоянный прямой ток. Обычно он составляет от 10 до 100 мА. При токе более 100 мА светодиод необходимо устанавливать на радиатор.

4. Максимальный допустимый импульсный прямой ток. Обычно он составляет сотни миллиампер и более. Импульсный режим работы применяется для светодиодов инфракрасного диапазона спектра, применяемых для передачи информации.

5. Поток излучения (общая мощность, излучаемая источником) Φ_e (Вт), от единиц до десятков милливатт и более (для инфракрасного диапазона). Для видимого диапазона длин волн поток излучения приводится в люменах.

6. Сила излучения (мощность излучения на единицу телесного угла).

7. Максимальное допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр}$ (единицы вольт).

8. Диапазон температур окружающей среды при которых светодиод может нормально работать, например от – 60 до +85 °С.

Одной из основных характеристик светодиодов является спектральная характеристика. Спектральная характеристика показывает зависимость мощности излучения от длины волны. В настоящее время применяются светодиоды способные работать в участках спектра от ультрафиолетового до инфракрасного. В таблице приведены материалы для наиболее широко используемого спектрального диапазона от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного излучения.

Цвет свечения	Длина волны, нм	Материал светодиода
Ультрафиолетовый	~400	GaN, InGaN
Синий	470	GaN, InGaN
Зелёный	525	InGaN
	565	GaAlInP, GaP
Жёлтый	590	GaAlInP, GaP
Красный	660	GaAlAs
	700	GaP
Инфракрасный	880	GaAlAs, GaAs
	940	GaAlAs, GaAs
	1260	GaInPAs

Параметры полупроводниковых излучателей как элементов электрической схемы определяются вольт-амперной характеристикой. Различия прямых ветвей ВАХ полупроводниковых излучателей из разных материалов вызваны прежде всего различием в ширине запрещенной зоны и соответственно в высоте потенциального барьера на р-п-переходе. Обратные ветви ВАХ не представляют практического интереса, так как полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом

должны работать только при включении в прямом направлении. Следует, однако, иметь в виду, что пробивные напряжения полупроводниковых излучателей с выпрямляющим электрическим переходом не превышают нескольких вольт. Полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом обладают относительно малым сопротивлением при включении этого перехода в прямом направлении. Поэтому такие излучатели следует считать токовыми приборами, питаемыми от источников или генераторов тока. Для обеспечения правильного режима питания светодиода необходимо ограничить проходящий через него ток, для чего между светодиодом и источником достаточно поставить токоограничительный резистор. Напряжение, которое падает на этом резисторе, значительно больше, чем прямое напряжение диода. Световой поток излучаемый светодиодом в данном режиме питания является постоянным.

Важной характеристикой светодиода является диаграмма направленности излучения, которая определяется конструкцией диода, в частности наличием линзы, и другими факторами. Излучение может быть направленным или рассеянным (диффузным). На рис. 14 иллюстрируется распространение потока излучения в виде «лепестков» диаграмм направленности для трех светодиодов. Диаграмма, представленная на первом рисунке, относится к имеющему плоское окно светодиоду, боковое излучение в котором ограничивается корпусом. Ограничив диаграмму направленности по уровню $0,5 I_e$ (относительной силы излучения), получим угловое поле 40° . Таким образом можно определить «ширину диаграммы направленности по половинной мощности», которая для рассматриваемого примера составит около 80° . На втором рисунке в качестве примера приведена диаграмма направленности светодиода, линза которого позволяет получить угол излучения 30° , между тем как в случае, представленном на рисунке 3, этот угол составляет 10° .

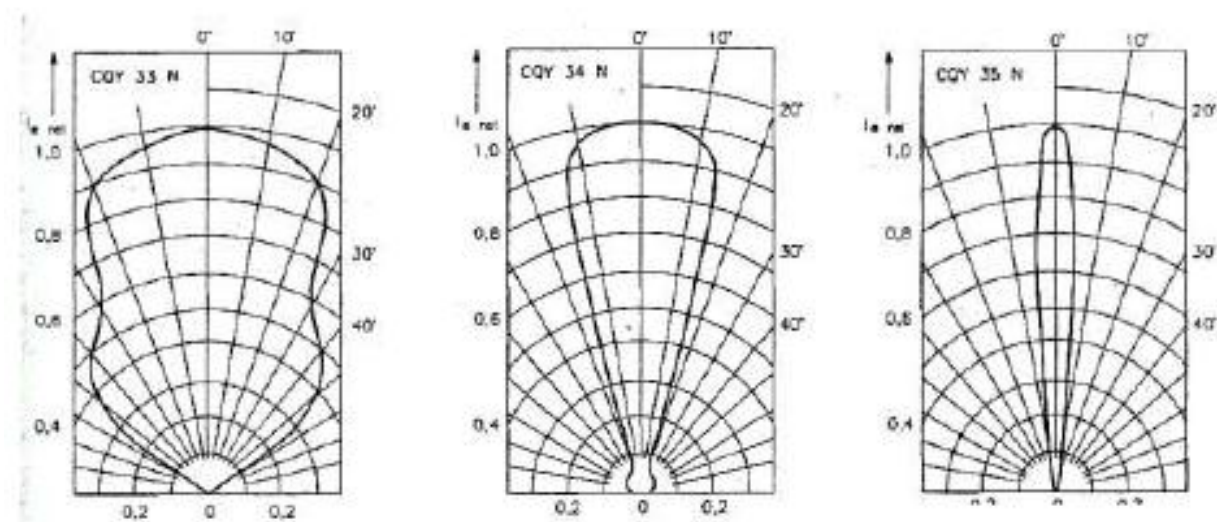


Диаграмма направленности излучения светодиода с плоским окном

Излучение можно сконцентрировать за счет снабжения корпуса светодиода линзой

Диаграмма, соответствующая углу 10° при половинной силе излучения

Рис.14. Диаграмма направленности излучения светодиода.

При этом необходимо понимать, что в отличие от ламп накаливания светодиоды излучают свет в относительно узкой полосе спектра, ширина которой составляет 20...50 нм. Они занимают промежуточное положение между лазерами, свет которых монохроматичен (излучение со строго определенной длиной волны), и лампами различных типов, излучающих белый свет (смесь излучений различных спектров). Иногда такое «узкополосное» излучение называют квазимонохроматическим.

Поскольку СИД является твердотельным прибором, срок его службы должен превышать долговечность оборудования, где он установлен. Однако чрезвычайно медленная естественная диффузия примесей в кристаллическое полупроводниковое соединение наряду с другими не совсем ясными механизмами приводит к тому, что с течением времени световой поток несколько уменьшается. Как правило срок службы СИД определяется как время, за которое световой поток понижается до 50% своего первоначального значения. Для СИД с излучением в видимом диапазоне обычно приводится срок службы 100 000 ч (свыше 11 лет) для нормальных рабочих условий.

Скорость деградации также зависит от выбранного рабочего тока, его снижение ослабляет деградацию и увеличивает срок службы. Совершенствование светодиодов проходило по двум направлениям – увеличение внешнего квантового выхода и расширение спектра излучения. Велик вклад в работу советских ученых, в частности Ж.И. Алферова, еще в 1970-е гг., разработавшего так называемые многопереходные двойные гетероструктуры, позволяющие значительно увеличить внешний квантовый выход за счет ограничения активной области рекомбинации. Использовались гетероструктуры на основе арсенидов галлия-алюминия, при этом был достигнут внешний квантовый выход до 15% для красной части спектра (световая отдача до 10 лм/Вт) и более 30% – для инфракрасной.

Исследование других гетероструктур привело к созданию эффективных светодиодов, излучающих в других областях спектра. В середине девяностых годов был реализован светодиод на основе гетероструктуры InGaN/GaN (рис. 15) с эмиссией излучения в планарном направлении. Особенностью таких светодиодов является высокая интенсивность люминесценции, достигающая (2-3) кд и высоким значением квантового выхода – 5,4 %.

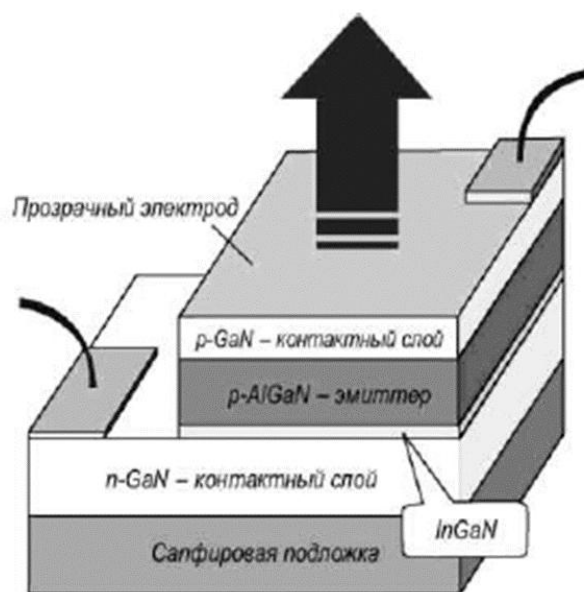


Рис. 15. Типичная структура светодиода с планарной генерацией излучения на основе гетероструктур InGaN/GaN

Внутренний слой InGaN имеет меньшую ширину запрещенной зоны, чем наружный слой GaN, поэтому верхний электрод является прозрачным для оптического излучения видимого диапазона. Светодиоды на основе гетероструктур InGaN/GaN

- а) голубой светодиод с двойной гетероструктурой;
- б) зеленый светодиод с квантовой ямой

В синих светодиодах используется активный слой $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$, легированный цинком. В зеленых светодиодах активный слой толщиной 3 нм имеет состав $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$. При реализации зеленого светодиода был использован гетеропереход p-AlGaN и n-GaN, выращенный на сапфире. Тонкий слой InGaN с одной стороны является демпфером между p-AlGaN и n-GaN, сводя к минимуму рассогласование решеток, а с другой стороны формирует одиночную квантовую яму, где происходит эффективная излучательная рекомбинация. Изменение толщины активного слоя меняет энергетический спектр 2D электронов и позволяет управлять длиной волны излучения светодиода. Такая приборная реализация позволяет повысить силу света до 10 кд на длине волны 520 нм с квантовой эффективностью 6,3 % и временем жизни светодиода 50 тысяч часов.

Возможность создания экономичных и долговечных светодиодов на основе нитрида галлия, согласованных по спектру с естественным освещением и чувствительностью человеческого глаза, открывает новые перспективы для их нетрадиционного использования. Среди них использование светодиодов в транспортных многосекционных светофорах, индивидуальных микромощных лампочках освещения (при мощности 3 Вт световой поток составляет 85 Лм), в осветительных приборах автомобилей.

Изобретение синих светодиодов сделало возможным создание светодиодов белого света. На данный момент существуют три способа получения белого света с помощью светодиодов. Первый из них – смешивание в определенной пропорции излучения красного, зеленого и синего светодиодов (рис. 16). При этом могут быть использованы как отдельные светодиоды разных

цветов, так и трехкристальные светодиоды, объединяющие кристаллы красного, синего и зеленого свечения в одном корпусе.

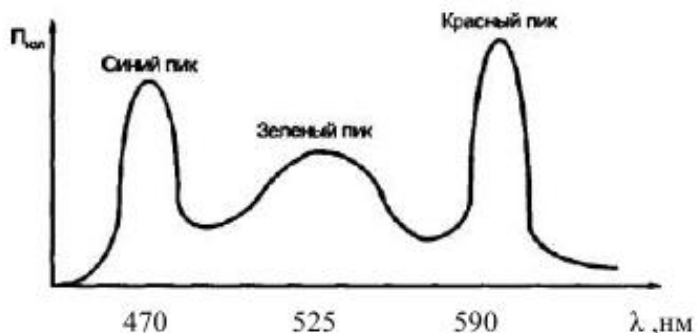


Рис. 16. Зависимость спектральной плотности излучения от длины волны, необходимая для получения белого света путем смешивания в определенной пропорции излучения красного, зеленого и синего светодиодов.

Основой более дешевого и распространенного светодиода белого света является полупроводниковый кристалл структуры InGaN (рис. 17), излучающий на длине волны 460...470 нм (синий свет) и нанесенный сверху на поверхность кристалла люминофор на основе YAG (иттрий – гадолиниевых гранатов), активизированный Ge^{3+} , излучающий в широком диапазоне видимого спектра и имеющий максимум в его желтой части.

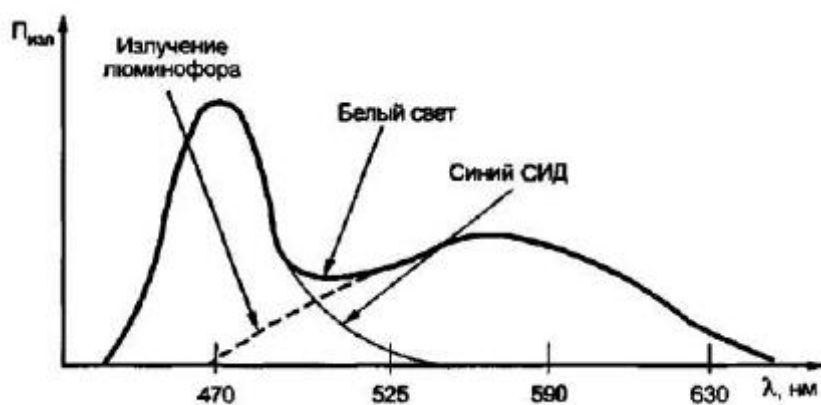


Рис. 17. Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него слоя желтого люминофора.

Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый цвет. Такие светодиоды намного дешевле трёхкристальных, обладают хорошей

цветопередачей, а по светоотдаче (до 30 лм/Вт) они уже обогнали лампы накаливания.

Еще один метод получения белого света – возбуждение трехслойного люминофора светодиодом ультрафиолетового спектра.

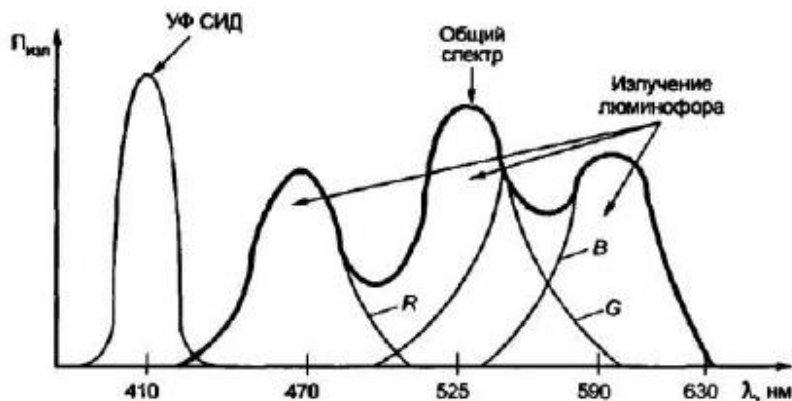


Рис. 18. Получение белого света с помощью светодиода и YAG люминофора. Тонкие линии – характеристики трех люминофоров (R, G, б); толстая линия – результирующая характеристика

Кристалл светодиода – практически точечный источник света, поэтому корпус может быть миниатюрным. Конструкция корпуса светодиода должна обеспечить минимальные потери излучения при выходе во внешнюю среду и фокусирование света в заданном телесном угле. Кроме того, должен быть обеспечен эффективный отвод теплоты от кристалла. Самая распространенная конструкция светодиода – традиционный пятимиллиметровый корпус.

В течение последних лет область применения светоизлучающих диодов значительно увеличилась. Если ранее светодиоды относились к индикаторам электронных приборов, то сегодня, они встречаются на дорожных знаках, на светофорах, на приборной панели машин и т.д. Автопромышленность без светодиодов уже не обходится, их очень активно внедряют в сигнальные огни торможения, а также габаритные фонари. Широкую область применения светодиодов можно легко объяснить технологическими достижениями в разработке мощных диодов, благодаря чему с каждым годом такое освещение все увереннее вытесняет уже привычные, но порядком устаревшие источники освещения, такие как, лампы накаливания, галогенные лампы накаливания,

компактные люминесцентные лампы т.д. Если сравнивать с другими лампочками, то главные преимущества светодиодов – это большой срок службы и направленное излучение. Светоизлучающие диоды не содержат ртути, как газоразрядные или люминесцентные лампочки, что значительно облегчает проблему с утилизацией. Время выхода светового потока на максимальное значение, сразу после включения лампы, это всего доля секунды, благодаря чему можно подобрать освещение любого тона, начиная с желтого теплого и заканчивая белым дневным или голубым холодным. Использование светодиодов, как источников света, помогает значительно уменьшить расходы на электроэнергию.

Светодиоды инфракрасного излучения

Эти полупроводниковые приборы функционируют при $\lambda > 0,78$ мкм и отличаются от обычных светодиодов тем, в опико-электронных приборах они работают обязательно в паре с фотоприемником. Поэтому важной характеристикой является остронаправленность излучения и стабильность λ_{\max} . При спектральном согласовании светодиода с соответствующим фотоприемником используют параметр $\Delta\lambda_{0.5}$, определяющий полосу наивысшей спектральной плотности инфракрасных лучей данного диода (эффективная взаимная работа элементов прибора достигается при совпадении значения $\Delta\lambda_{0.5}$ излучения и фоточувствительности приемника).

У диодов в металлостеклянных корпусах инфракрасные лучи испускает полусферическая поверхность, на которую нанесено диэлектрическое просветляющее покрытие. Приборы в миниатюрных пластмассовых корпусах имеют излучательную головку выпуклого профиля из прозрачного компаунда.

Светодиоды инфракрасного излучения применяются: в фотоэлектронной автоматике, внешних устройствах вычислительной техники, системах преобразования угол-код, оптронных коммутационных устройствах, фотонных линиях связи и др.

В процессе работы светодиода больше половины мощности потребления преобразуется в тепло. Количество выделяющегося тепла сильно влияет на характеристики устройства, в частности, электрические и оптические. Увеличение температуры до 75 °С приводит к 20% снижению интенсивности излучения. При создании любого осветительного устройства на светодиодах обеспечение теплового режима играет ключевую роль, определяет срок службы устройства. Обязательным требованием к созданию светодиодной осветительной системы является поддержание температуры р-n перехода ниже определенного максимально допустимого значения. Основными источниками зарождения тепла являются активная область (за счет процессов безызлучательной рекомбинации), места контактов разнородных материалов.

При длительной непрерывной работе светодиодный чип деградирует по причине генерации дефектов, электрической миграции атомов материалов. Деградация сильнее проявляется при повышенной температуре, протекании тока больше номинального рабочего значения. Для расчета теплового сопротивления R_{th} участка цепи используют выражение:

$$R_{th} = L / (S \cdot \sigma) \quad (10),$$

где L – длина участка цепи, например, толщина слоя; S – площадь участка цепи; σ – коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплопроводности сильно изменяется в зависимости от температуры. Другая функциональная зависимость, характеризующая изменение температуры между двумя точками переноса тепла при рассеивании тепловой мощности P_Q :

$$R_{th} = (T_2 - T_1) / P_Q \quad (11).$$

Тепловая мощность определяется исходя из мощности потребления светодиода за исключением мощности P_{opt} , преобразуемой в световое излучение:

$$P_Q = I \cdot U - P_{opt}, \quad (12)$$

где I – электрический ток, протекающий через светодиод, U – падение напряжения на нем.

Основным путём переноса тепла в одиночном светодиоде является следующий: р-п переход чипа → точка крепления корпуса светодиода к печатной плате, так называемая «точка пайки» → печатная плата → радиатор → окружающая среда. В этом случае поток тепла последовательно встречает тепловые сопротивления:

- между р-п переходом и точкой пайки;
- между точкой пайки и печатной платой;
- между печатной платой и радиатором;
- между радиатором и окружающей средой.

Общее тепловое сопротивление выражается суммой всех компонент. Тепловое сопротивление каждого элемента светодиодной системы определяется расчётным путём и эмпирически [3-5].

Инфракрасные светодиоды и фотодиоды повсеместно применяются в пультах дистанционного управления (телевизора или табло часов), системах автоматики, охранных системах, в военной сфере – лазерные ИК-прицелы, системы наведения управляемых ракет, дальномеры, прожекторы для приборов ночного видения, в промышленном оборудовании – датчики движения и подсчета, дефектоскопы, дальномеры, ИК-уровни и отвесы, устройства передачи информации по оптическим линиям связи, источники для накачки мощных твердотельных лазеров. Такое широкое применение ИК светодиодов объясняется тем, что инфракрасные излучатели не отвлекают и не привлекают внимание человека в следствие невидимости.

Оптроны

Оптронами называются оптоэлектронные приборы, в которых имеются излучатели и фотоприемники и 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 изменение напряжения или приводит к изменению сопротивления фотоприемника. Наибольшее распространение получили оптроны с внешними электрическими выходами и выходными сигналами и внутренними оптическими сигналами (рис. 19).



Рис. 19. 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, в качестве которого может служить светодиод или миниатюрная лампа накаливания. Оптической средой может быть воздух, стекло, пластмасса или волоконный световод. В качестве фотоприемников используются фотодиоды, 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 применяется и другая разновидность оптронов: использующая внешние входные и выходные оптические сигналы и внутренние электрические сигналы, как показано на рис. 20. Обычно такие приборы имеют усилители фототока. В отдельных случаях

применяются оптроны, одновременно использующие оптические и электрические связи, рис. 21.



Рис. 20. Оптрон с внешней оптической связью

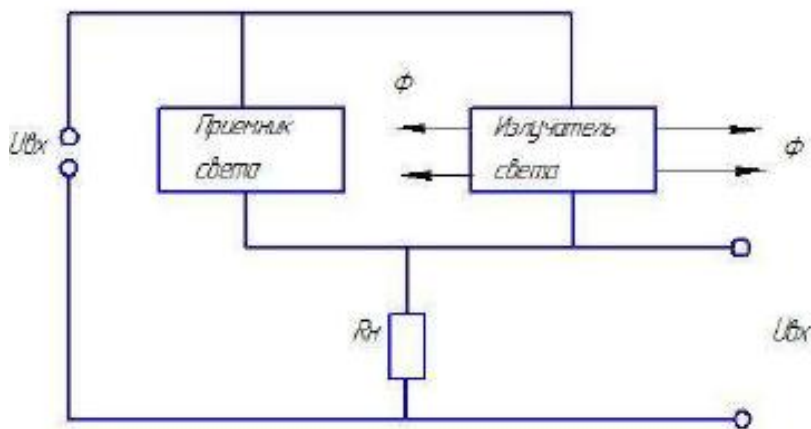


Рис. 21. Оптроны, одновременно использующий оптические и электрические связи

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.

Требования к виду оптического окна излучателя и светодиода существенно различаются. Светодиоды изготавливают с кольцевой излучающей областью площадки, чтобы получить высокий коэффициент отношения площади видимой излучающей области к общей площади. В

оптроне излучающая область должна быть настолько малой, насколько это совместимо с допустимой плотностью тока, а контактная площадка размещена так, чтобы минимально затемнилась излучающая область. Смещение контактной площадки создает минимальное затемнение (затенение) излучающей области и обеспечивает лучшую связь с приемником. Малый размер излучающей области позволяет уменьшить краевые потери как тока, так и излучения и обеспечить постоянство условий связи независимо от разброса величины зазора и точности совмещения светодиода с чувствительной областью фотоприемника у различных образцов оптронов.

При выборе оптической среды ее изолирующие свойства играют определяющую роль, если расстояние между излучателем и приемником очень мало. Если же расстояние велико, например при использовании волоконной оптики, линз или другой среды, изолирующие свойства менее важны. Зато большое значение приобретает спектр пропускания, особенно если применяются пластмассы. В большинстве оптронов для уменьшения потерь на френелевское отражение от поверхности излучателя и приемника используют просветляющие покрытия. При этом одновременно выполняется изоляция, так как материалы покрытий не являются проводниками электрического тока. Во многих типах оптронов для создания хорошей изоляции между излучателем и приемником применяют слой пленки из прозрачного фторопласта. Оптическая изоляция позволяет получить прибор, обеспечивающий оптическую связь сигналов двух отдельных электронных устройств, несмотря на то, что устройства гальванически развязаны.

Принципиальные физические достоинства оптронов, обусловленные 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 ею 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 микроэлектронных 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), и 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. Широкое применение оптронов определяется прежде всего неповторимостью достоинств этих приборов.

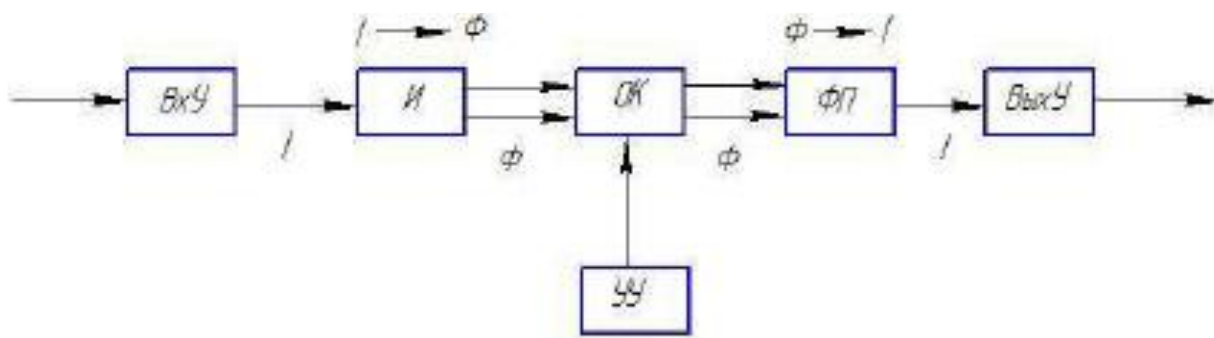


Рис. 22. Структурная схема оптрона

Входное устройство ВхУ служит для преобразования входных сигналов в такие, которые обеспечивают эффективную работу излучателя И. Дополнительные требования к входному устройству: экономичность, достаточно высокое быстродействие (не снижающее быстродействия оптрона в целом). Основные требования, предъявляемые к излучателю оптрона, состоят в достижении высокого КПД электронно-оптического преобразования, высокого быстродействия и узкой направленности излучения. Кроме того, обычно желательно, чтобы минимальный входной ток был невелик (примерно 1 мА); для линейных систем важен также широкий динамический диапазон входных токов, т. е. широкий диапазон токов, в котором квантовая эффективность излучателя и соответственно коэффициент передачи по току оптрона постоянны.

Назначение оптического канала ОК – максимально полная передача энергии оптического сигнала от излучателя И к фотоприемникам ФП, которая требует высокого пропускания оптического сигнала без искажения формы. При этом необходимо обеспечить минимальное рассеяние излучения в стороны во избежание влияния на другие чувствительные к оптическому сигналу элементы устройства и максимальную защиту от внешнего излучения во избежание ложных срабатываний оптрона.

Принципиальная возможность управления свойствами оптического канала (например, с помощью электрооптических или магнитооптических эффектов) обеспечена введением в структурную схему оптрона устройства

управления УУ. При этом изменение выходного сигнала можно осуществлять как по электрическому входу оптрона, так и по оптическому входу фотоприемника. Возможны и другие конструктивные изменения оптического канала, изменяющие функции оптрона. Так, оптрон с открытым ОК (воздушный зазор между И и ФП) пригоден для считывания информации с перфоносителей, перемещающихся в этом зазоре. Выбирая оптический канал, который меняет свойства при внешних неэлектрических воздействиях, можно получить разнообразные оптоэлектронные датчики.

В ФП происходит преобразование оптического сигнала в электрический с минимальными потерями его информативности, что требует высокой фоточувствительности ФП при достаточном быстродействии. Иногда ФП выполняет и функцию предварительного усиления фотосигнала. Очевидно, что эффективность работы цепочки «И-ОК-ФП» может быть реализована лишь при согласовании спектральных характеристик всех входящих в нее элементов.

Выходное устройство ВыхУ обеспечивает преобразование сигнала ФП в стандартную форму, удобную для передачи в следующие за оптроном каскады (чаще всего это аналоговые или цифровые микросхемы или полупроводниковые ключи). Так же как и для входного устройства, здесь имеют значение быстродействие.

Таким образом, для всех звеньев оптрона важны КПД того преобразования, которое в этом звене осуществляется, и быстродействие. При этом необходимо согласование элементов – по оптическим и электрическим характеристикам – по спектральной – в цепи «излучатель – оптический канал – фотоприемник»;

- по электрическим – в цепях «входное устройство – излучатель» и «фотоприемник – выходное устройство»;

- недопустимым условиям эксплуатации (диапазон рабочих температур, срок службы, механическая прочность и т. п.);

- по конструктивно-технологическим признакам.

Обеспечение согласования и совместимости элементов – центральная задача оптимального конструирования оптронов.

Классификация и параметры оптронов

Одним из основных элементов оптоэлектронных цепей является оптрон, представляющий собой оптически связанную пару из электрически управляемого источника оптического излучения и фотоприемника, электрические характеристики которого могут изменяться в довольно широких пределах в зависимости от интенсивности излучения. В основу классификации оптронов могут быть положены различные критерии. Оптроны можно классифицировать по основному функциональному назначению. Различают три типа оптронов:

1) оптроны с внешней оптической и внутренней электрической связями, предназначенные для усиления и преобразования излучения;

2) оптроны с внутренней оптической связью, используемые в качестве переменных сопротивлений;

3) оптроны с электрической связью, используемые в качестве ключевых элементов.

Другим критерием для классификации оптронов может служить тип используемого фотоприемника, выбором которого в основном определяются параметры оптронов. По этому критерию оптроны подразделяются на использующие:

- фотодиоды;
- одиночные фототранзисторы;
- составные фототранзисторы;
- фототиристоры;
- фоторезисторы.

К основным параметрам оптрона относятся:

- коэффициент передачи тока,
- сопротивление развязки,
- быстродействие.

Коэффициент передачи тока K_I определяется как отношение тока на выходе оптрона к току на входе:

$$K_I = \eta_U \cdot K_n \cdot \eta_{\text{фп}} \cdot G, \quad (13)$$

где $\eta_U = \frac{N_U}{I_{\text{вх}}/e}$ – квантовая эффективность излучателя, определяемая отношением числа излученных квантов N_U к числу электронов, прошедших через p-n-переход излучателя, K_n – коэффициент, характеризующий передачу света; $\eta_{\text{фп}}$ – эффективность фотоприемника, определяемая как отношение числа носителей заряда, прошедших в выходной цепи, к числу поглощенных квантов; G – коэффициент усиления; N – число излученных квантов.

Увеличение коэффициента передачи является одной из основных задач при конструировании оптронов, поэтому целесообразно проследить возможность повышения каждой его составляющей. Увеличение квантовой эффективности излучателя может быть достигнуто повышением доли излучательных переходов в процесс рекомбинации, что связано:

- с совершенствованием структуры и повышением чистоты полупроводникового материала;

- с использованием для излучателей непрямозонных полупроводников, в которых процесс излучательной рекомбинации связан с наличием мелких рекомбинационных центров, в силу чего излучаются кванты, энергия, которых меньше энергии, соответствующей ширине запрещенной зоны полупроводника, и, следовательно, вероятность поглощения которых в полупроводнике существенно снижается;

- с использованием кристаллов специальной формы (например, полусферической) и покрытий с коэффициентами преломления, близкими к коэффициенту преломления полупроводника, для снижения потерь, связанных с полным внутренним отражением на границе раздела «полупроводник – окружающая среда».

Эффективность фотоприемника определяется его электрофизическими и структурно-топологическими параметрами. Выбор оптимального сочетания этих параметров при конструировании фотоприемника с учетом требований к его спектральной характеристике позволяет повысить эффективность η_{fn} . Высокая спектральная согласованность фотоприемника и излучателя – одно из основных средств повышения η_{fn} . Повышение коэффициента передачи тока состоит в уменьшении зазора между излучателем и фотоприемником и в оптимальном выборе оптической среды между ними. Кроме того, его повышение может быть достигнуто снижением коэффициента отражения на границе оптической среды и фотоприемника за счет нанесения просветляющего слоя. Увеличение коэффициент усиления достигается, если на одном кристалле с фотоприемником изготавливается усилитель. В простейшем случае это один дополнительный транзистор к фототранзистору (схема Дарлингтона) [3-6].

Резисторные оптроны

В резисторных оптопарах в качестве излучателя используется светоизлучающий диод, ИК-излучающий диод или сверхминиатюрная лампочка накаливания. В качестве фотоприемного элемента используется фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого уменьшается при воздействии видимых световых лучей или невидимых инфракрасных. Уменьшение сопротивления фоторезистора происходит за счет генерации светом пар свободных носителей заряда – электронов и дырок, увеличивающих электропроводность полупроводника. Фоторезисторы оптопар обычно изготавливаются на основе селенида кадмия (CdSe) или сернистого кадмия (CdS). Важным требованием является согласованность спектральных характеристик излучателя и приемника. Темновой ток фоторезистора при отсутствии воздействия света излучателя обычно составляет единицы микроампер. При облучении проводимость фоторезистора значительно возрастает (в сотни, тысячи раз). Проводимость пропорциональна силе света излучателя, поэтому путем изменения тока излучателя можно управлять проводимостью фоторезистора. Свойства фоторезисторов не зависят от полярности приложенного напряжения, что позволяет включать фоторезисторы в цепь переменного тока. Фоторезистор и излучатель объединены внутри корпуса оптопары оптически прозрачной средой (клеем) с высоким сопротивлением изоляции, поэтому цепь излучателя надежно изолирована от выходной цепи оптопары – фотоприемника. Повышение температуры фоторезистора приводит к увеличению его светового сопротивления и снижению фототока. При повышении температуры темновой ток увеличивается, темновое сопротивление уменьшается. Недостатком резисторных оптопар является низкое быстродействие.

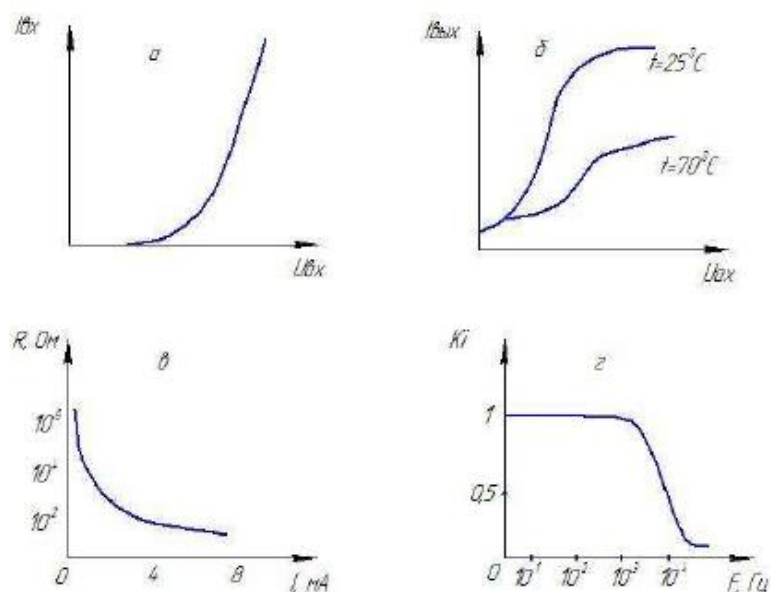


Рис. 23. Характеристики резисторной оптопары: входная ВАХ (а), выходная температурная передаточная (б), зависимость выходного сопротивления от входного тока (в) и частотная характеристика (г).

Резисторные оптопары применяются преимущественно для бесконтактной коммутации и управления в цепях постоянного и переменного тока. Достоинствами резисторных оптопар, определяющими их широкое применение, являются линейность и симметричность выходной характеристики, отсутствие фото-ЭДС, возможность работы при высоком напряжении в выходной цепи любой полярности (сотни вольт), высокое темновое сопротивление ($R_T = 10^6.. 10^{11}$ Ом) [3-6].

Диодные оптопары

В диодной оптопаре в качестве фотоприемного элемента используется фотодиод на основе кремния, а излучателем служит инфракрасный излучающий диод.

Максимум спектральной характеристики излучающего диода приходится на длину волны 1 мкм. При облучении в фотодиоде возникает генерация пар носителей заряда – электронов и дырок. Интенсивность генерации пропорциональна силе света, а следовательно, входному току. Свободные электроны и дырки разделяются электрическим полем перехода фотодиода и заряжают р-область положительно, а n-область отрицательно. Таким образом, на выходных выводах оптопары появляется фото-ЭДС. В реальных приборах она не превышает 0,7...0,8 В, а КПД составляет около 1%. Если к фотодиоду оптопары приложено обратное напряжение более 0,5 В, то электроны и дырки, генерированные излучением, увеличивают обратный ток фотодиода. Такой режим работы приемного элемента оптопары называется фотодиодным. Обратный фототок практически линейно возрастает с увеличением силы света излучающего диода.

Для повышения быстродействия создаются фотодиоды с р-і-п-структурой. В них между легированными областями р и п-типа используется полуизолирующий слой кремния с собственной проводимостью і. Возникающее в і-области сильное электрическое поле приводит к сокращению времени пролета носителей заряда через эту область и к быстрому нарастанию и спаду фототока. Время нарастания и спада фототока в таких фотодиодах может составлять единицы и даже доли наносекунд. Однако быстродействие оптопары в целом зависит еще и от быстродействия излучателя, а также от сопротивления выходной нагрузки. Реальное время задержки сигнала в диодном оптроне составляет около 1 мкс.

Для описания свойств диодных оптопар обычно используют входные и выходные ВАХ, передаточные характеристики в фотогенераторном и

фотодиодном режимах. Выходная характеристика оптопары аналогична обратной ветви ВАХ диода. Обратный ток практически не зависит от напряжения. При высоком напряжении возникает электрический пробой фотодиода. Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от входного и практически линейна в широком диапазоне входных токов. Коэффициент передачи тока составляет единицы процентов. Передаточная характеристика в фотогенераторном режиме нелинейна. ФотоЭДС при увеличении входного тока стремится к насыщению: она не может превышать контактной разности потенциалов на переходе фотодиода и составляет обычно 0,5...0,8В.

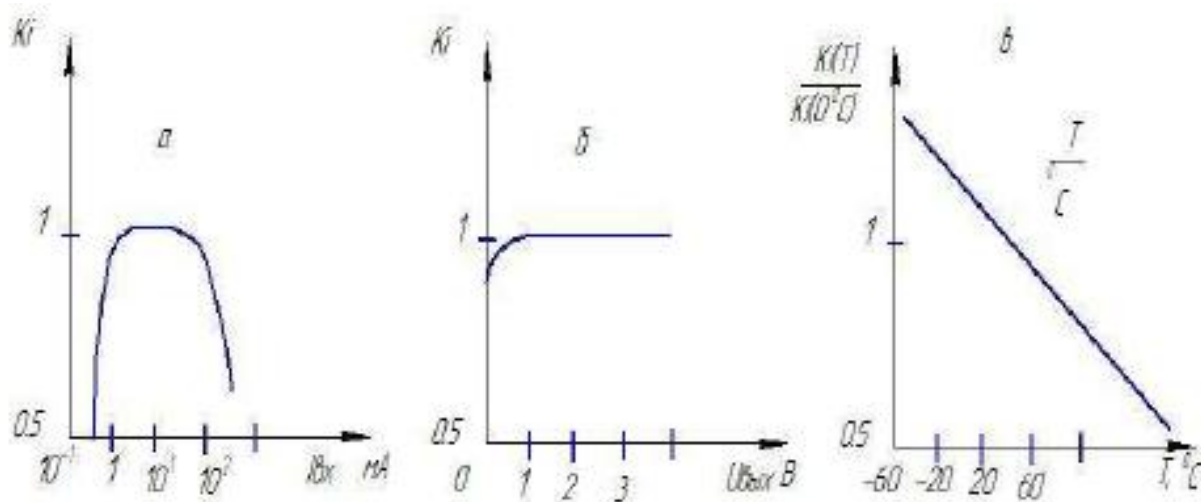


Рис. 24. Зависимость коэффициента передачи оптопар от входного тока (а) выходного напряжения (б) и температуры (в)

При использовании диодных оптопар в электронных устройствах реализуется ряд свойств, присущих этому классу оптопар: высокое быстродействие, низкий темновой ток в выходной цепи, высокое сопротивление гальванической развязки [3-6].

Транзисторные оптопары

Транзисторная оптопара с фотоприемным элементом изготавливается на базе фототранзистора. Обычно в оптопарах используются фототранзисторы с *n-p-n*-структурой на основе кремния, чувствительные к излучению с длиной волны около 1 мкм. Излучателями служат арсенид-галлиевые диоды или диоды на тройном соединении, максимум спектрального излучения которых лежит вблизи области наибольшей чувствительности фототранзистора.

Излучательный диод конструктивно расположен так, что большая часть света направляется на базовую область фототранзистора. Излучатель и приемник изолированы друг от друга оптически прозрачной средой.

При отсутствии излучения в цепи коллектора фототранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, протекает обратный темновой ток, аналогичный по происхождению и характеристикам току в обычных биполярных транзисторах. Обратный темновой ток существенно зависит от температуры. При повышении температуры на 10°C он увеличивается примерно в два раза. Для уменьшения темнового тока между выводами базы и эмиттера фоторезистора включается внешний резистор с сопротивлением 0,1... 1,0 МОм. При облучении в базовой области генерируются пары «электрон-дырка». Электроны вытягиваются из базы в сторону положительно заряженного коллектора, а дырки остаются в базе и создают положительный заряд. Это явление эквивалентно возникновению отпирающего тока базы транзистора, вследствие чего ток коллектора также увеличивается. Соотношение токов базы и коллектора имеет вид:

$$I_{\text{вых}} = h_{210э} \cdot I_{\text{ф.б.}}$$

где $I_{\text{ф.б.}}$ – генерированный излучением фототок в базе фоторезистора. Таким образом, фоторезистор обладает внутренним усилением фототока K_I . Наибольшим внутренним усилением обладают оптопары, использующие составные фототранзисторы – их коэффициент усиления фототока K_I может превышать 1000 единиц, однако у них худшие показатели быстродействия. Быстродействие обычных диодно-транзисторных оптопар составляет $t_p = 2...4$ мкс. Оптопары можно характеризовать таким параметром, как добротность:

$Q = K_I / t_n$. Для разных типов оптопар добротность остается постоянной в широком интервале значений входных токов. Добротность зависит от напряжения изоляции $U_{из}$.

Основные параметры и характеристики входной цепи транзисторной оптопары аналогичны параметрам диодных оптопар, ввиду использования сходных излучателей. Выходные характеристики существенно отличаются от аналогичных оптопар. Зависимость коэффициента передачи тока от входного тока отклоняется от линейной, причем тем больше, чем больше входной ток и лучше усилительные свойства фоторезистора.

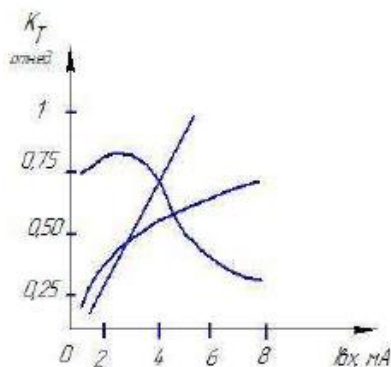


Рис. 25. Зависимость коэффициента передачи по току от входного тока для транзисторных оптопар.

Нелинейность характеристик объясняется тем, что коэффициент усиления транзистора зависит от тока базы и поэтому не является постоянной величиной. При больших входных токах коэффициент передачи по току с повышением температуры линейно уменьшается, как и в случае диодных оптопар. В общем случае характер кривых определяется зависимостью от температуры квантового выхода как светодиода, так и транзистора. Повышение температуры приводит к возрастанию инерционности транзисторных оптопар. Одновременно увеличивается и темновой ток фотоприемника. Это особенно сильно сказывается в случае оптопар с составными фоторезисторами: при увеличении температуры с 25 до 100°C темновой ток в них возрастает в $10^4 \dots 10^5$ раз, а в обычных оптопарах – в $10^2 \dots 10^3$ раз. Транзисторные оптопары находят применение в аналоговых и цифровых коммутаторах, оптоэлектронных реле, в линиях связи для гальванической развязки и др [3-5].

Тиристорные оптопары

В тиристорных оптопарах в качестве приемного элемента используется кремниевый фототиристор. Фототиристор, как и обычный тиристор, имеет четырехслойную структуру р-п-р-п. Конструктивно оптопара выполнена так, что основная часть излучения входного диода направлена на высокоомную базовую п-область фоторезистора. К крайним областям – аноду р и катоду п прикладывается внешнее выходное напряжение плюсом к аноду. При облучении в п-базе генерируются пары носителей заряда – электронов и дырок. Электрическим полем центрального (коллекторного) перехода между п- и р-областями носители заряда разделяются. При этом электроны остаются в п-базе, а дырки попадают в р-базу. Происходит инжекция неосновных носителей заряда из крайних переходов структуры, называемых эмиттерными. Лавинообразное нарастание тока через структуру приводит к отпиранию тиристора. Все три перехода оказываются смещенными в прямом направлении, и падение напряжения на фототиристоре в отпертом состоянии оказывается небольшим. Фототиристор, так же как и фототранзистор, характеризуется большим внутренним усилением фототока. В отличие от фототранзистора, фототиристор остается включенным и после прекращения излучения входного диода.

Таким образом, управляющий сигнал на тиристорную оптопару может подаваться только в течение короткого периода, необходимого для отпирания тиристора. Этим достигается существенное уменьшение энергии, потребной для управления тиристорной оптопарой. Чтобы запереть тиристор, с него надо снять внешнее напряжение. Если тиристор включается в цепь переменного или пульсирующего напряжения, то выключение тиристора происходит при уменьшении напряжения и тока через тиристор до значения напряжения, при котором не может поддерживаться включенное состояние прибора.

При отсутствии входного сигнала, что соответствует необлученному состоянию базовой п-области, через фототиристор протекает малый темновой

ток утечки. Темновой ток сильно зависит от температуры. Тиристорные оптопары используют в качестве ключей для коммутации больших токов и высоковольтных цепей как радиоэлектронного ($U = 50 \dots 600 \text{ В}$, $I = 0,1 \dots 10,0 \text{ А}$), так и электротехнического ($U = 100 \dots 1300 \text{ В}$, $I = 6 \dots 320 \text{ А}$) назначения. Время переключения тиристорных оптопар составляет от десятков микросекунд до десятков миллисекунд.

Достоинство этих приборов состоит в том, что, управляя значительными мощностями в нагрузке, они потребляют малую мощность цепями управления и поэтому совместимы по входу с интегральными микросхемами[3-6].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Описание установки

Лабораторные работы по курсу выполняются с помощью комплекта учебно-лабораторного оборудования «Оптоэлектроника». Устройство комплекса представлено на рис. 1.

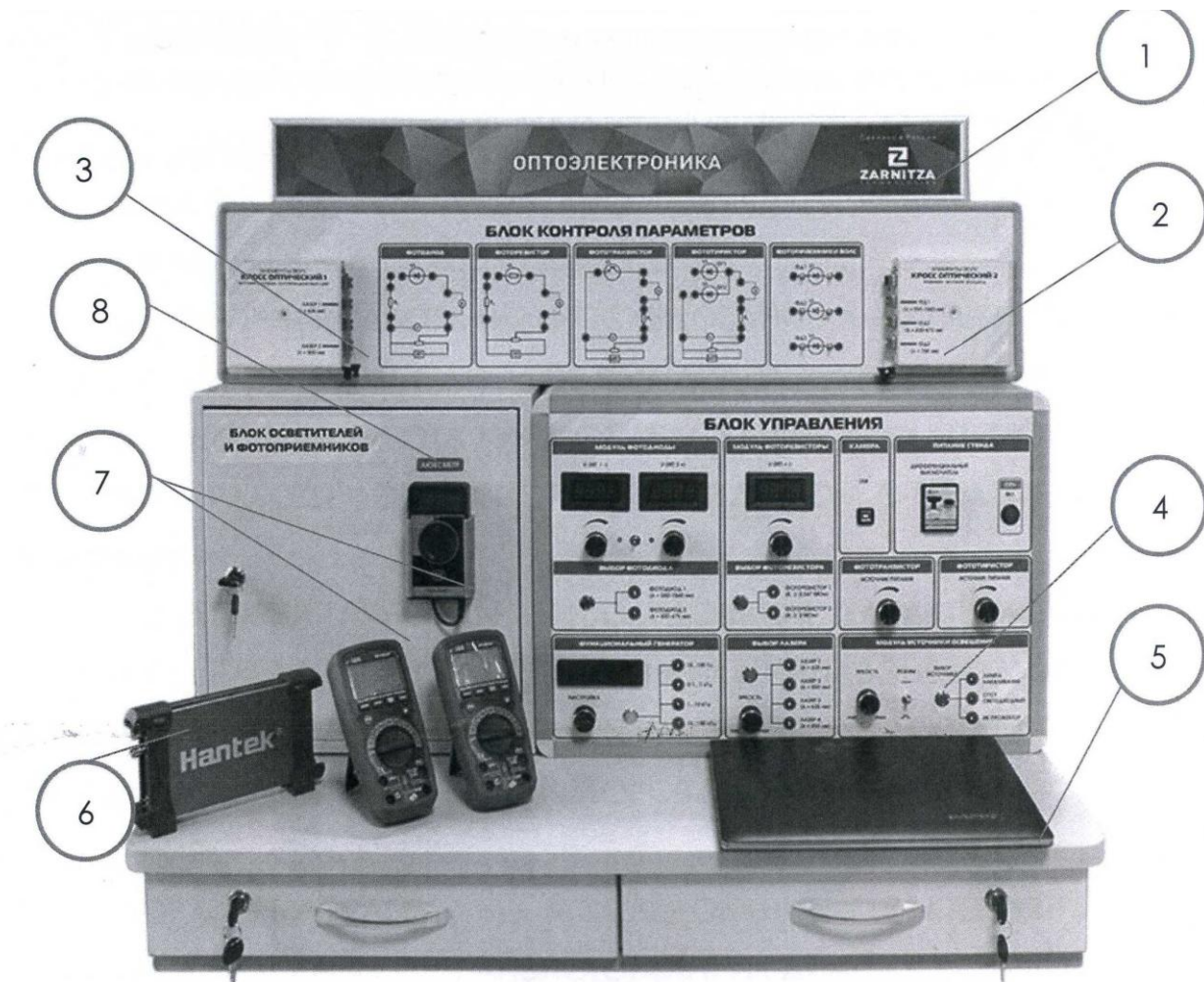


Рисунок 1. Состав оборудования. 1 - Блок контроля параметров с элементами ВОЛС; 2 - Блок управления; 3 - Блок осветителей и фотоприемников; 4 - Ноутбук; 5 - Боксы для хранения приборов и соединителей; 6 - USB осциллограф; 7 - Мультиметры; 8 - Люксметр.

В блок управления входит (рис. 2):

1. Модуль питания стенда.
2. Дифференциальный выключатель.
3. Выключатель питания.

4. Регулятор напряжения питания фототиристора.

5. Регулятор напряжения питания фототранзистора.

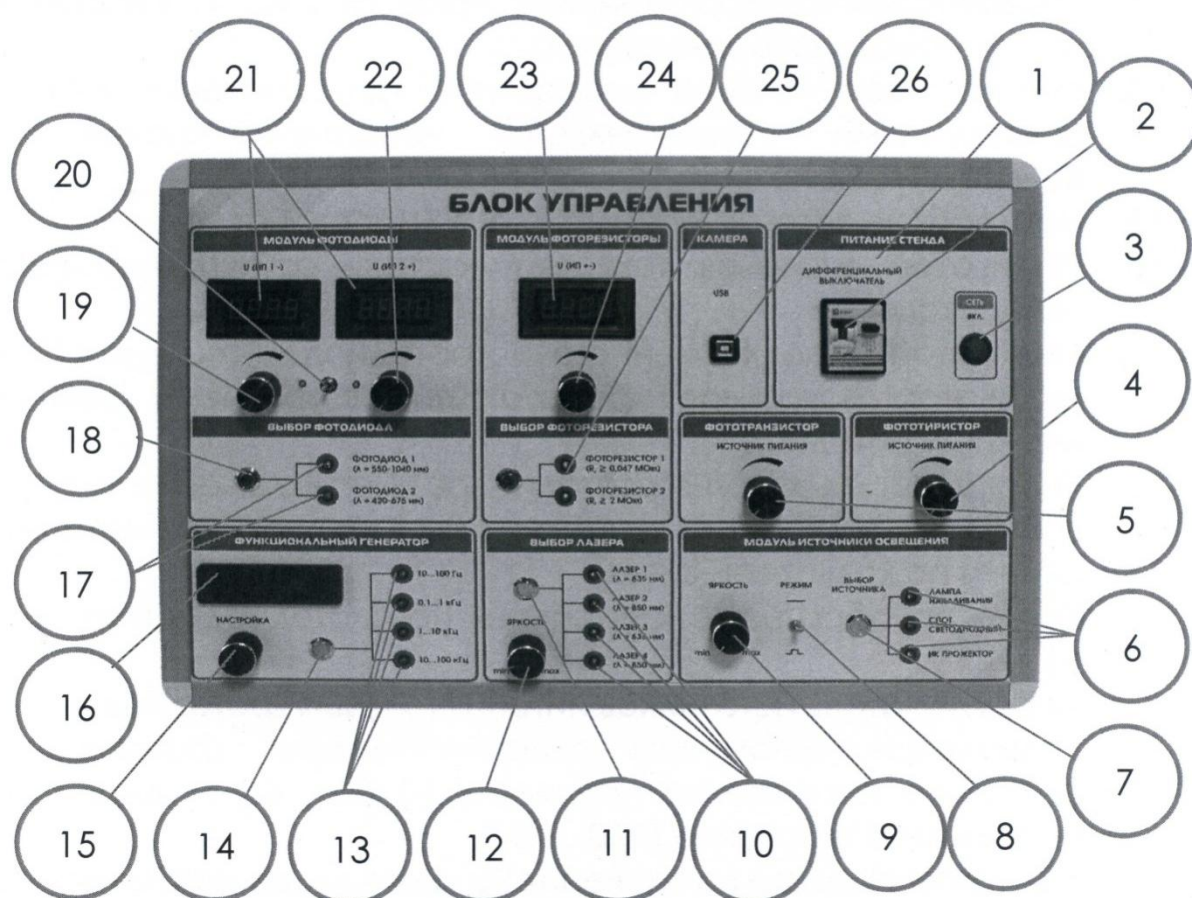


Рис. 2. Элементы блока управления.

6. Индикаторы включения источников света. Светящийся индикатор соответствует включению соответствующего осветителя.

7. Кнопка включения и переключения источников света. Переключение осуществляется последовательным нажатием кнопки.

8. Тумблер переключения с обычного режима на импульсный и обратно.

9. Регулятор яркости источников света.

10. Индикаторы включения лазеров. Светящийся индикатор соответствует включению соответствующего лазера.

11. Кнопка включения и переключения лазеров. Переключение осуществляется последовательным нажатием кнопки по кольцевой схеме.

12. Регулятор яркости лазеров.
13. Индикаторы переключения частотных диапазонов функционального генератора.
14. Кнопка переключения диапазонов. Переключение между диапазонами осуществляется нажатием кнопки по кольцевой схеме.
15. Настройка частоты внутри каждого диапазона.
16. Индикатор значения текущей частоты функционального генератора.
17. Индикатор подключенного фотодиода. Светящийся индикатор показывает работающий в схеме в данный момент фотодиод.
18. Кнопка переключения фотодиодов. Переключение между фотодиодами происходит при последовательном нажатии кнопки по кольцевой схеме.
19. Регулятор обратного напряжения на фотодиоде. Источник (-).
20. Переключатель источников питания (-/+) для фотодиода.
21. Вольтметры источников питания модуля фотодиодов. Диапазон напряжения источника (-): от 0 до 65 В. Диапазон напряжения источника (+) от 0 до 10В.
22. Регулятор прямого напряжения на фотодиоде источника(+).
23. Вольтметр источника питания фоторезистора.
24. Регулятор напряжения на фоторезисторе.
25. Кнопка переключения фоторезистора и индикаторы выбора фоторезистора.
26. Гнездо USB, служащее для подключения ик камеры к ноутбуку для визуализации работы фотоприемников. Программное обеспечение предустановлено на компьютере.

В блок контроля параметров входит (рис. 3):

1. Кросс оптический настенного исполнения. В кроссе размещены источники лазерного излучения: лазер 1 ($\lambda=632$ нм), лазер 2 ($\lambda=850$ нм).



Рис. 3. Элементы блока контроля параметров.

2. Розетки оптические для подключения оптического патч-корда.

3. Наборное поле для подключения измерительных приборов и переключателей при исследовании характеристик фотодиода.

4. Наборное поле для подключения измерительных приборов и переключателей при исследовании характеристик фоторезистора.

5. Наборное поле для подключения измерительных приборов и переключателей при исследовании характеристик фототранзистора.

6. Наборное поле для подключения измерительных приборов и переключателей при исследовании характеристик фототиристора.

7. Наборное поле для подключения осциллографа для контроля уровня передачи сигнала через оптический патч-корд на приемные фотодиоды.

8. Розетки оптические для подключения оптического патч - корда.

9. Кросс оптический настенного исполнения. В кроссе размещены фотодиоды VD1, VD2, VD3 в качестве приемников лазерного излучения.

В блок источников и приемников входит (рис. 4):

1. ИК прожектор.

2. Визуализатор ИК излучения – цифровая видеокамера.

3. Галогенный светильник (на фото находится за визуализатором).

4. Спот светодиодный.

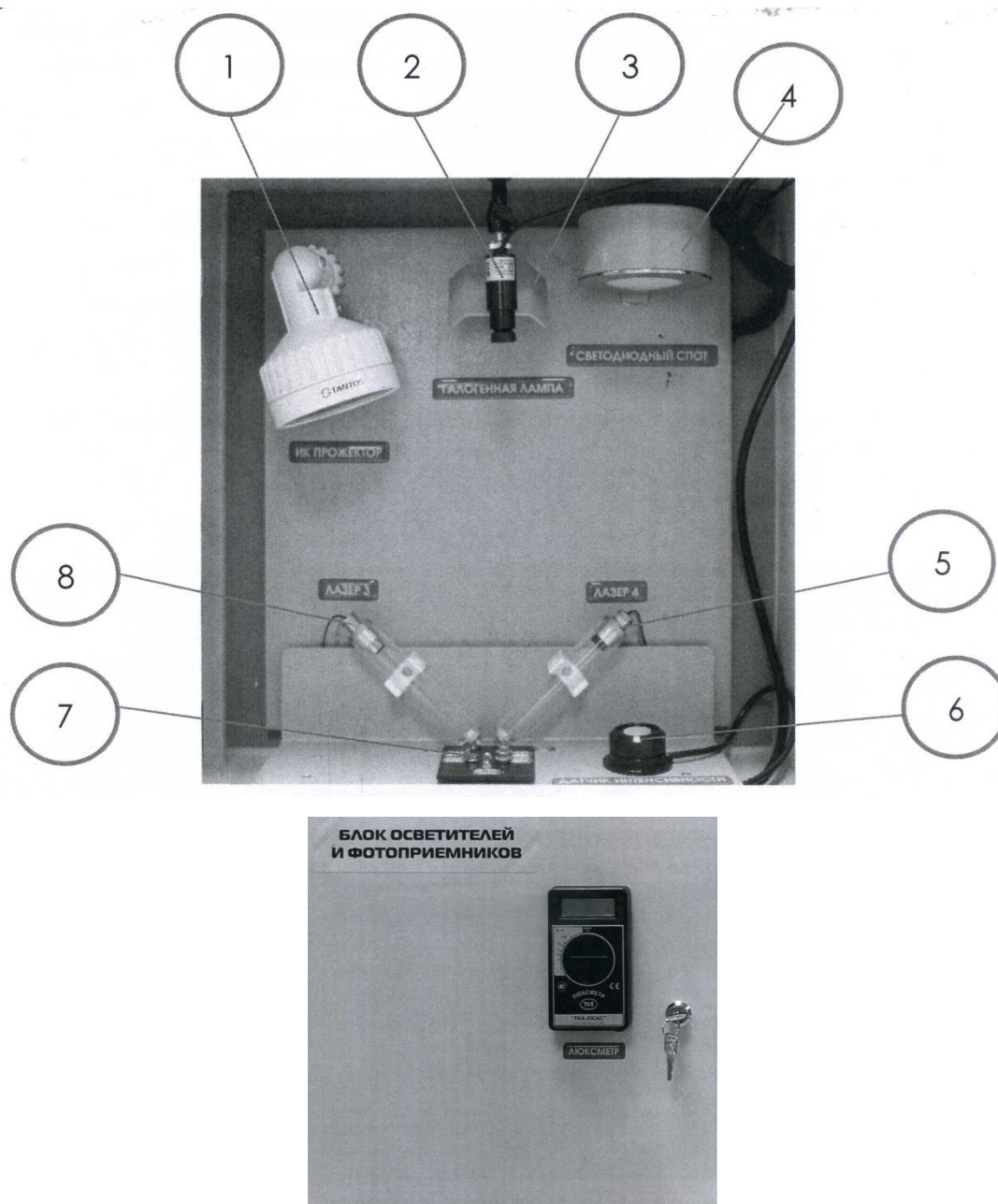


Рис. 4. Элементы блока источников и приемников и их внешний вид.

5. Лазер ИК излучения ($\lambda=850$ НМ) для исследования параметров фототиристора.

6. Датчик освещенности люксметра.

7. Модуль фотоприемников.

8. Лазер видимого излучения ($\lambda=632$ нм) для исследования параметров фототиристора.

В модуль фотоприемников входит (рис. 5):

1. Фототиртистор 1.
2. Фототиристор 2.
3. Фоторезисторы.
4. Датчик люкметра.
5. Фотодиоды.
6. Фототранзистор.



Рис. 5. Модуль фотоприемников.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ФОТОДИОДОВ В ВИДИМОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомление явлением внутреннего фотоэффекта и принципом действия фотодиода. Снятие вольтамперной характеристики фотодиода.

Методика проведения эксперимента:

От источника питания U через делитель напряжения Π (рис. 6) напряжение смещения подается на фотодиод. Знак напряжения смещения прямого или обратного можно изменять с помощью переключателя K .

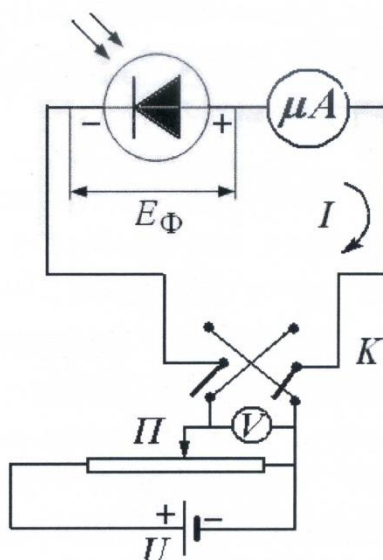


Рис. 6. Схема лабораторной установки.

Тумблер имеет два положения: левое подключает обратное напряжение, правое подключает прямое напряжение (при этом загораются соответствующие светодиоды). Выбор исследуемого фотодиода осуществляется нажатием кнопки, при этом загорается соответствующий светодиод. Ток и напряжение измеряется на соответствующих контрольных точках наборного поля «Фотодиод» блока контроля параметров с помощью мультиметров, входящих в комплект. Напряжение так же контролируется с помощью соответствующего индикатора на блоке управления. В разрыв цепи на наборном поле (рис. 7)

необходимо установить переключку с помощью электрического соединительного шнура. Источниками света в данной работе служит маломощная галогенная лампа накаливания (12 В, 10 Вт), светодиодный спот (12 В) и ИК прожектор. Выбор источника осуществляется кнопкой модуля «Источники освещения» «Блока управления». При этом загорается соответствующий светодиод. При погашенных индикаторах не горит ни один из источников освещения. Интенсивность излучения изменяется регулятором «Яркость». Свет от источника падает на фотодиод, установленный в модуле фотоприемников. Интенсивность светового потока измеряется люксметром через датчик, установленный в «Блоке осветителей и фотоприемников».

Для изучения работы элементов волоконно-оптических систем (ВОЛС), на «Блоке контроля» параметров закреплены оптические кроссы 1 и 2 с установленными оптическими розетками. Розетки служат для подключения волоконно-оптических кабелей, через которые передается оптический сигнал видимого и ИК диапазона (от источников – лазеров 1 и 2 из кросса 1) на фотоприемники – фотодиоды кросса 2. Изменение уровня электрического сигнала при этом контролируется цифровым осциллографом, подключенным к соответствующим контактам наборного поля «Фотоприемники ВОЛС» блока контроля параметров.

Задание 1.

1. Внимательно изучить руководство эксплуатации на данный комплект.
2. В присутствии преподавателя подключить установку к сети 220 В соединительным шнуром.
3. Включить дифференциальный выключатель, включить кнопку «Вкл» при этом на кнопке должна загореться индикация включения.
4. Включить ноутбук. Шнуром USB A-B соединить гнездо USB модуля «Камера» Блока управления с любым входом USB ноутбука. На панели задач «кликнуть» ярлычок с изображением камеры. Выбрать камеру визуализатор и «Кликнуть» по этой строке. На экране должно появиться изображение части

«Модуля фотоприемников» (при достаточном освещении: при открытой дверце «Блока источников и фотоприемников» или при включении любого из источников освещения).

5. Подключить щупы мультиметра к соответствующим контактам наборного поля «Фотодиод» «Блока контроля параметров», обозначенным знаком (А). Поворотный переключатель мультиметра установить в крайнее правое положение (цена деления 1 мкА). Разъединенные контакты соединить кабелем.

6. Снять вольтамперную характеристику при подаче поочередно прямого и обратного напряжения при выключенных источниках освещения и закрытой дверце «Блока осветителей и фотоприемников».

7. Снять вольтамперную характеристику при подаче поочередно прямого и обратного напряжения при естественном освещении, при выключенных источниках освещения, приоткрыв дверцу «Блока осветителей и фотоприемников». При прямом включении на фотодиод можно подавать напряжение не более 12 В. При обратном включении на фотодиод можно подавать напряжение не более 65 В.

8. Снять вольтамперную характеристику при подаче поочередно прямого и обратного напряжения при включенной галогенной лампе, изменяя яркость свечения. Повторить измерения, выключив лампу и включив поочередно светодиодный спот и ИК прожектор.

9. Уровень яркости контролировать, снимая показания люксметра.

10. Разработать таблицу. Данные измерений занести в таблицу и по ним построить графики зависимости $I=f(U)$.

11. Ответить на контрольные вопросы.

Задание 2.

1. Отключить мультиметр.

2. Подключить цифровой осциллограф к 2-м свободным портам USB компьютера (красный USB разъем питание осциллографа). Нажать на ярлык осциллографа на панели задач.

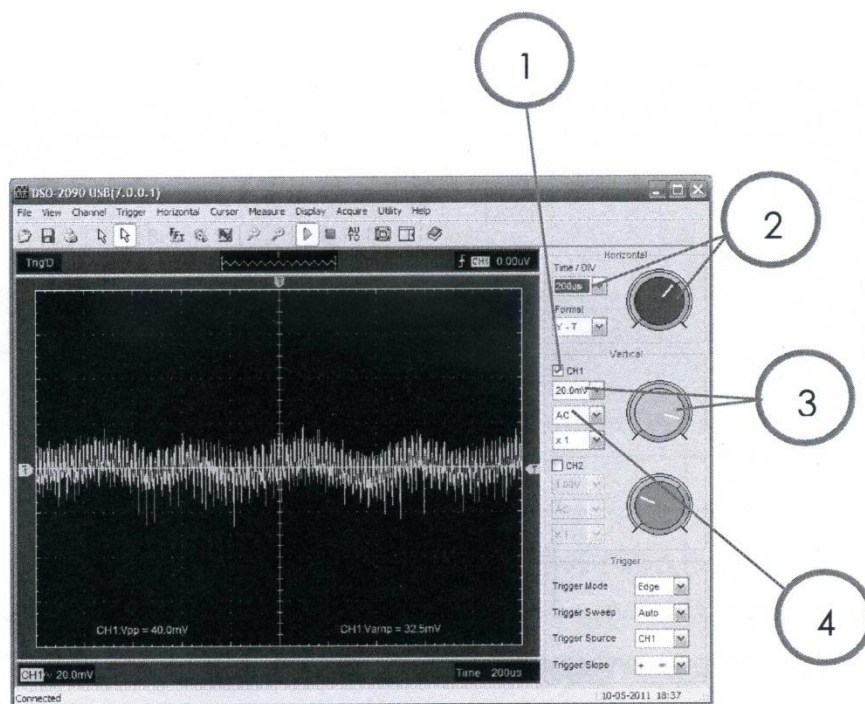


Рис. 7. Окно цифрового осциллографа. 1 – выбор канала, 2 – регулятор временного интервала, 3 – установка цены деления, 4 – выбор рода напряжения.

3. В появившемся на мониторе компьютера изображении экрана и элементов управления, выбрать канал CH1, поставив галочку в соответствующем окне. На указателе рода напряжения установить DC – постоянное, если оно не установится автоматически.

4. Подключить оптический патч-корд к розеткам лазер 1 и лазер 2 «Кросса оптического 1». При этом необходимо предварительно снять защитные заглушки на торцах патч-корда и учитывать положение пазана оптической розетке и выступа на оптическом штекере.

5. Подключить другой конец патч-корда к розеткам VD1, VD2 «Кросса оптического 2».

6. Подключить щуп осциллографа к контактам наборного поля модуля «Фотоприемники ВОЛС» «Блока контроля параметров», в зависимости от

фотодиода, отклик которого на оптический сигнал мы изучаем в данный момент.



Рис. 8. Подключение осциллографа к блоку контроля параметров.

7. Поворотным регулятором временного интервала или на выпадающем списке выбрать значение интервала 200 μ s. Поворотным регулятором канала CP1 или на выпадающем списке установить цену деления 100-200 mV при контроле сигнала от лазера 1 (видимое излучение) и 20-50, при контроле сигнала от лазера 2 (ИК излучение). На указателе рода напряжения установить DC-постоянное, если оно не установится автоматически.

8. Включить лазер 1 кнопкой на модуле «Выбор лазера» «Блока управления», при этом загорится соответствующий индикатор. Регулятор яркости установить в положение min. Наблюдать состояние сигнала на экране осциллографа последовательно на каждом испытуемом фотодиоде, при необходимости переключая патч-корд в соответствующие розетки и переставляя щуп осциллографа на соответствующие контакты. Повторить наблюдение, выставив мощность излучения лазера регулятором яркости на max и выключив – включив лазер. Повторить наблюдение, плавно изменяя интенсивность излучения при включенном лазере.

9. Повторить эксперимент, используя лазер 2.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается ток в металлическом проводе от тока через p-n-переход?
2. Каков механизм диффузионного и дрейфового тока через p-n-переход?

3. Что такое прямой ток? Обратный ток?
4. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
5. Почему р-n-переход фотодиода смещен в обратном направлении
6. Какой ток – прямой или обратный – возрастает в фотодиоде под действием света?
7. Что происходит при освещении фотодиода, если не него не подавать внешнего напряжения?
8. Почему n-область фотодиода изготавливается тонкой?
9. Где можно применять фотодиоды?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ФОТОРЕЗИСТОРОВ В ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с явлением внутреннего фотоэффекта и принципом действия фоторезистора. Снятие люкс-омической и вольтамперной характеристики фоторезистора.

Методика эксперимента:

1. Внимательно изучить руководство по эксплуатации на данный комплект.
2. В присутствии преподавателя подключить установку к сети 220В соединительным шнуром.
3. Включить дифференциальный выключатель, включить кнопку «Вкл» при этом на кнопке должна загореться индикация включения.
4. Включить ноутбук. Шнуром USB A-B соединить гнездо USB модуля «Камера» «Блока управления» с любым входом USB ноутбука. На панели задач «кликнуть» ярлычок с изображением камеры. Выбрать камеру визуализатор и «кликнуть» по этой строке. На экране должно появиться изображение части «Модуля фотоприемников» при достаточном освещении: при открытой дверце «Блока источников» и наборного поля «Фоторезистор» «Блока контроля параметров фотоприемников» или при включении любого из источников освещения.



Рис. 9. Подключение мультиметра и установка переключки для исследования параметров фоторезистора.

5. Подключить щупы мультиметра к соответствующим контактам обозначенным знаком (A). Поворотный переключатель мультиметра установить в крайнее правое положение (цена деления 1 мКА). Разъединенные контакты соединить кабелем

6. Регулировка напряжения как отрицательного так и положительного осуществляется переменным резистором модуля подключив его к соответствующим контактам модуля «Фоторезистор» «Блока управления».

7. Значение напряжения отображается на индикаторе встроенного вольтметра модуля «Фоторезисторы» «Блока управления». Напряжение можно контролировать и с помощью мультиметра, подключив его к соответствующим контактам модуля «Фоторезисторы» «Блока контроля параметров».

8. Выбор исследуемого фоторезистора осуществляется помощью кнопки модуля «Фоторезистора».

9. Снять вольт-амперную характеристику отрицательного и положительного напряжения при выключенных источниках освещения и закрытой дверце «Блока осветителей и фотоприемников».

10. Снять вольтамперную характеристику при подаче отрицательного и положительного напряжения при естественном освещении, при выключенных источниках освещения, приоткрыв дверцу «Блока осветителей и фотоприемников».

11. Снять вольтамперную характеристику при подаче отрицательного положительного напряжения при включенной галогенной лампе, изменяя яркость свечения. Повторить измерения, выключив лампу и включив поочередно светодиодный спот и ИК прожектор.

12. Уровень яркости контролировать, снимая показания люксметра.

13. Повторить измерения для фоторезистора 2.

14. Регулятор напряжения установить в положение 0 В. Отсоединить мультиметр, снять перемычку.



Рис.10. Подключение мультиметра для снятия люкс-омической характеристики.

15. Щупы мультиметра подсоединить к контактам, показанным на рисунке 10.

16. Поворотный регулятор мультиметра установить в положение измерения сопротивления.

17. Измерить сопротивление фоторезистора при выключенных источниках освещения и закрытой дверце «Блока осветителей и фотоприемников».

18. Регулятор «Яркость» модуля «Источник освещения» Блока управления установить в положение min.

19. Кнопкой включить галогенную лампу. Поворотным регулятором включить люксметр.

20. Увеличивая интенсивность освещения регулятором яркости, снимать одновременно показания мультиметра и люксметра.

21. Разработать таблицу. Данные занести в таблицу.

22. Построить световую (люкс-омическую характеристику) фоторезистора.

23. Повторить эксперимент со светодиодным спотом и ИК прожектором.

24. Повторить эксперимент для фоторезистора 2.

25. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизмы собственной и примесной проводимости в полупроводниках с точки зрения зонной теории.
2. Что такое «темновая» электропроводность полупроводника?
3. Что называется фотопроводимостью?
4. Что такое внутренний фотоэффект в полупроводниках?
5. Как образуются избыточные носители заряда в полупроводниках под действием квантов света?
6. Укажите возможные типы переходов электронов при поглощении квантов света.
7. Как связана критическая длина волны с характеристиками полупроводника при собственной и примесной фотопроводимости?
8. Что такое квантовый выход внутреннего фотоэффекта?
9. Объясните характер зависимости фототока от светового потока, падающего на фоторезисторы.
10. Как и почему изменяется электропроводность полупроводников в зависимости от длины волны, падающего излучения?
11. Перечислите основные характеристики и параметры фоторезисторов.
12. Перечислите основные достоинства и недостатки фоторезисторов.
13. Каковы конструктивные особенности и основные рабочие характеристики фоторезисторов?
14. Опишите область применения фоторезисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРИНЦИПА РАБОТЫ
ФОТОТРАНЗИСТОРОВ В ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с явлением внутреннего фотоэффекта и принципом действия фототранзистора. Снятие вольт-амперной характеристики фототранзистора.

Ход работы:

1. Внимательно изучить руководство по эксплуатации на данный комплект. 2. В присутствии преподавателя подключить установку к сети 220 В соединительным шнуром.

3. Включить дифференциальный выключатель, включить кнопку «Вкл» при этом на кнопке должна загореться индикация включения.

4. Включить ноутбук Шнуром USB A-B соединить гнездо USB модуля «Камера» «Блока управления» с любым входом USB ноутбука. На панели задач кликнуть ярлычок с изображением камеры. Выбрать камеру визуализатор и кликнуть по этой строке. На экране должно появиться изображение части «Модуля фотоприемников» при достаточном освещении: при открытой дверце «Блока источников и фотоприемников» или при включении любого из источников освещения.

5. Подключить щупы мультиметра к соответствующим контактам наборного поля «Фототранзистор» Блока контроля параметров, обозначенным знаком (А). Мультиметр установить в крайнее правое положение (цена деления 1 мкА) (рис.11).



Рис. 11. Подключение мультиметра для снятия вольт-амперной характеристики фототранзистора.

6. Регулятор напряжения модуля «Фототранзистор» «Блока управления» должен находиться в крайнем правом положении (min).

7. Снять вольт-амперную характеристику, вращая регулятор напряжения по часовой стрелке при выключенных источниках освещения и закрытой дверце «Блока осветителей и фотоприемников».

8. Снять вольт-амперную характеристику при естественном освещении, при выключенных источниках освещения, приоткрыв дверцу «Блока осветителей и фотоприемников».

9. Снять вольт-амперную характеристику при включенной галогенной лампе, изменяя яркость свечения. Повторить измерения выключив лампу и включив поочередно светодиодный спот и ИК прожектор.

10. Уровень яркости контролировать, снимая показания люксметра.

11. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы работы фототранзистора?

2. Чем определяется спектральная чувствительность фототранзистора?

3. Какие физические явления определяют инерционные свойства фототранзисторов?

4. Объясните принцип построения нагрузочной линии для фототранзистора.

5. Укажите рабочую область фототранзистора на семействе выходных характеристик.

6. Каковы основные характеристики фототранзистора?

7. Указать основные области применения полупроводниковых фототранзисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРИНЦИПА РАБОТЫ
ФОТОТИРИСТОРОВ В ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомление с явлением внутреннего фотоэффекта и принципом действия фототиристора.

Методика эксперимента:

Описание установки для изучения работы фототиристора: Фототиристор 1 и фототиристор 2 установлены в прозрачных акриловых трубках (рис. 5) на модуле фотоприемников светочувствительным слоем вверх. Сверху в трубках закреплены лазер 3 видимого излучения ($\lambda=632$ нм) и лазер 4 ИК излучения ($\lambda=850$ нм). Прозрачные трубки позволяют визуализировать освещение рабочей зоны тиристорных источников излучения с помощью камеры визуализатора. Выбор лазеров и управление их интенсивностью осуществляется кнопкой и регулятором «Яркость» на модуле «Выбор лазера» «Блока управления». Выбранный лазер отмечен световым индикатором. Регулировка напряжения на тиристоре осуществляется переменным резистором модуля «Фототиристор» «Блока управления».

Задание 1.

1. Внимательно изучить руководство по эксплуатации на данный комплект. 2. В присутствии преподавателя подключить установку к сети 220 В соединительным шнуром.

3. Включить дифференциальный выключатель, включить кнопку «Вкл» при этом на кнопке должна загореться индикация включения.

4. Включить ноутбук. Шнуром USB A-B соединить гнездо USB модуля «Камера» Блока управления с любым входом USB ноутбука. На панели задач «кликнуть» ярлычок с изображением камеры. Выбрать камеру визуализатор и кликнуть по этой строке. На экране должно появиться изображение части

«Модуля фотоприемников» при достаточном освещении: при открытой дверце «Блока источников и фотоприемников» или при включении любого из источников освещения.



Рис. 12. Подключение мультиметра для построения вольт-амперной характеристики тиристора.

5. Подключить щупы мультиметра к соответствующим контактам наборного поля «Фототиристор» «Блока контроля параметров», обозначенным знаком (А). Поворотный переключатель мультиметра установить в крайнее правое положение (цена деления 1 мкА). Разъединенные контакты на схеме (рис. 12) для тиристора 1 соединить кабелем.

6. Выбрать лазер 3 кнопкой на модуле «Выбор лазера» «Блока управления», при этом должен загореться соответствующий индикатор.

7. Регулятор «Яркость» должен быть установлен в крайнее левое положение (min).

8. Регулятор напряжения модуля «Фототиристор» «Блока управления» должен быть установлен в крайнее левое положение (min).

9. Снять вольт-амперную характеристику, при различных значениях яркости излучения лазера 3.

10. Работу лазера контролировать на экране компьютера спомощью визуализатора.

11. При полном открытии (срабатывании) фототиристора, значение тока, контролируемое с помощью мультиметра, перестает изменяться при регулировке яркости свечения. Для приведения фототиристора в исходное

(закрытое) состояние необходимо отключить напряжение поворотом регулятора напряжение в крайнее левое положение (min). После этого эксперимент можно повторять.

12. Ответить на контрольные вопросы.

Задание 2.

1. Повторить действия согласно методическим рекомендациям к лабораторной работе №4, но в качестве источника освещения использовать лазер 4 и фототиристор 2.

2. Перемычку на наборном поле переключить для исследования фототиристора 2 (рисунок 12).

3. Снять вольт-амперную характеристику, изменяя значение яркости излучения лазера 4 и изменяя напряжение.

Контрольные вопросы

1. Опишите виды конструкции фототиристоров.
2. Каков принцип действия фототиристоров?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику фототиристора. Объясните ее участки?
4. В чем заключаются преимущества фототиристоров?
5. Перечислите основные параметры фототиристоров.
6. Где применяют фототиристоры?

Оформление отчета по лабораторным работам

Отчет по лабораторным работам должен содержать: титульный лист (общий для всех лабораторных работ), название и номер работы, её цель, приборы, оборудование и электронные компоненты, применяемые в ходе выполнения экспериментальной части, результаты исследования (измеренные значения, таблицы, графики, осциллограммы и т.п.) и выводы.

Полученные данные эксперимента студент частично обрабатывает в лаборатории, а окончательно – в ходе самостоятельной подготовки.

Отчет печатается на стандартном листе бумаги формата А4. Размер полей: левое поле – 35 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее и нижнее – не менее 20 мм. Шрифт Times New Roman размером 14, межстрочный интервал – 1,5. Нумерация страниц отчета – сквозная (первой страницей является титульный лист, номер страницы на титульном листе не проставляется).

Для построения графиков рекомендуется применять соответствующее программное обеспечение (Excel из пакета Microsoft Office, MicroLabOrigin, OpenOffice Calc, Mathcad, MATLAB и др.). При построении графиков необходимо на осях координат указывать обозначения откладываемых величин, единицы их измерений. Вдоль осей координат наносятся деления и проставляются в масштабе числовые значения.

Отчет, подписанный студентом с проставленной датой выполнения, представляется преподавателю на следующее лабораторное занятие. При защите работы студент должен объяснить любой выполненный эксперимент или расчет и ответить на дополнительные вопросы преподавателя по данной теме. Контрольные вопросы, знание ответов на которые обязательны, приведены в описании лабораторных работ.

Студенты, не представившие отчет и не получившие зачет по предыдущей работе, к выполнению последующих работ не допускаются. Отработка пропущенных лабораторных работ производится на индивидуальных занятиях по согласованию с преподавателем.

Список литературы

1. Гринёв, А. Ю., Наумов К.П., Пресленев Л.Н., Гигин Д.В, Ушаков В.Н. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н. Ушакова. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2009. – 264 с: ил.
2. Евпхихиев, Н.Н., Евтихиева О.А., Компанец И.Н. и др. Информационная оптика: Учебное пособие / Под ред. Н.Н. Евтихиева. – М.: Изд-во МЭИ, 2000.
3. Игнатов, А.Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 272 с.
4. Слепое, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000.
5. Иоргачев, Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-трендз, 2002.
6. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст]: учебник для вузов / А.Н. Пихтин. – М.: Высш. школа, 2001. – 499 с.

Содержание

Введение	3
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
Введение	5
Фотометрические величины	9
Приёмники и источники излучения	10
Полупроводники	13
Физические принципы работы полупроводниковых приёмников излучения	17
Фоторезистор	19
Фотодиод	23
Фототранзистор	31
Фототиристор	36
Светодиоды	38
Светодиоды инфракрасного излучения	47
Оптроны	50
Классификация и параметры оптронов	56
Резисторные оптроны	59
Диодные оптопары	61
Транзисторные оптопары	63
Тиристорные оптопары	65
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	67
Описание установки	67
Лабораторная работа №1. Исследование характеристик и принципа работы фотодиодов в видимом и инфракрасном диапазоне излучения	73
Лабораторная работа №2. Исследование характеристик и принципа работы фоторезисторов в видимом и ИК диапазоне излучения	79

Лабораторная работа №3. Исследование характеристик и принципа работы фототранзисторов в видимом и ИК диапазоне излучения	83
Лабораторная работа №4. Исследование характеристик и принципа работы фототиристоров в видимом и ИК диапазоне излучения	85
Оформление отчета по лабораторным работам	88
Список литературы	89

Учебно-методическое издание

Денис Владимирович Кузнецов,
Александр Валентинович Сидоров

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
для подготовки к лабораторным и практическим занятиям

Технический редактор – О. А. Ядыкина
Техническое исполнение – В. М. Гришин

Лицензия на издательскую деятельность
ИД № 06146. Дата выдачи 26.10.01.
Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.
Печ.л. 5,8 Уч.-изд.л. 5,5
Тираж 300 экз. (1-й завод 1-15 экз.). Заказ 92

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1