

А.В. Ситников

**Лабораторные работы
«Электроника и оптическая электроника»**

Методические указания

Воронеж 2018
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»**

А.В. Ситников

Лабораторные работы
«Электроника и оптическая электроника»

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебно-методического пособия

Воронеж 2018

УДК 621.52(075.8)

ББК 31.77Я7

С 142

Ситников А.В. Расчет процессов откачки вакуумных технологических установок: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (1,3 Мб) / А.В. Ситников – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018.- 71 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В работе приводятся краткие теоретические сведения, схемы, рисунки, графики, примеры выполнения вычислений необходимые для выполнения лабораторных работ.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлениям 16.03.01 «Техническая физика» (направленность «Физическая электроника»).

Табл. 10. Ил. 11. Библиогр. 4 назв.

Рецензенты: д.ф.-м.н., проф. А.Т. Косилов

© Ситников А.В., 2018

© ФГБОУ ВО «Воронежский
госудаственный технический
университет», 2018

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ СВЕДОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Цель работы: исследование диаграмм направленности полупроводниковых светодиодов. Ознакомление с основными типами конструкций светодиодов. Изучение влияния конструктивных особенностей прибора на вид угловой зависимости интенсивности излучения.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд, ученическая линейка, штангенциркуль, набор светодиодов.

ВВЕДЕНИЕ

Светодиод является полупроводниковым излучающим прибором с одним или несколькими электрическими переходами, который преобразует электрическую энергию в энергию некогерентного светового (электромагнитного) излучения.

Светоизлучающий диод (СИД) – основной и наиболее универсальный излучатель некогерентной оптоэлектроники. Это обуславливает следующие его достоинства: высокое значение КПД преобразования электрической энергии в оптическую; относительно узкий спектр излучения (квазимонохроматичность) для одного типа диодов, с одной стороны, и перекрытие почти всего оптического диапазона излучения диодами различных типов – с другой; высокая для некогерентного излучателя направленность излучения; малые значения прямого падения напряжения, что обеспечивает электрическую совместимость СИД с интегральными схемами; высокое быстродействие; малые габариты, технологическая

совместимость с микроэлектронными устройствами, высокая надежность и долговечность. Светодиоды используют в оптических линиях связи, индикаторных устройствах, оптопарах и т.д.

В основе принципа действия полупроводниковых излучающих приборов лежит явление самопроизвольной излучательной рекомбинации носителей заряда, инжектируемых через электронно-дырочный переход, смещенный в прямом направлении. Рекомбинация происходит в примыкающих к переходу слоях, ширина которых определяется диффузионными длинами L_n и L_p . Этот процесс в большинстве полупроводников осуществляется через примесные центры (ловушки), расположенные вблизи середины запрещенной зоны, и является безызлучательным. В процессе каждой рекомбинации выделяется энергия, определяемая разницей энергий между уровнями рекомбинирующих частиц и выделяемая в виде тепловой энергии (фонона). Эта энергия передается атомам решетки при безызлучательной рекомбинации. Однако в ряде случаев процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света – фотона. Это обусловлено тем, что в определенных материалах (GaAs, GaSb, InAs, InSb и т.д.) переход из зоны проводимости в валентную зону относится к числу переходов типа зона-зона. При этом примесные центры не играют существенной роли, и при рекомбинациях происходит выделение фотонов и возникает некогерентное свечение. Фотон, испущенный при переходе электрона, может вызвать индуцированное излучение идентичного фотона, заставив еще один электрон перейти в валентную зону (рис. 1.).

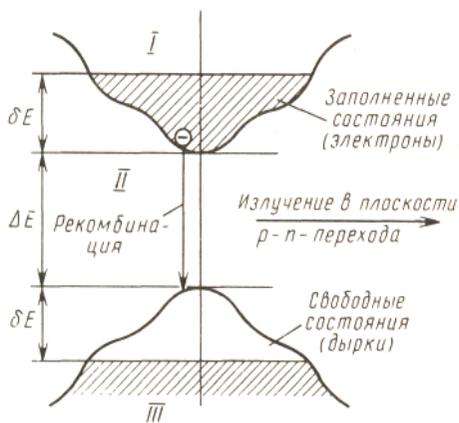


Рис. 1. Энергетическая диаграмма, поясняющая механизм действия инжекционного светодиода

При этом следует отметить, что фотоны с энергией, большей $\Delta+2\delta E$, в основном поглощаются, переведя электроны из валентной зоны в зону проводимости. Фотоны с энергией от ΔE до $\Delta E+2\delta E$ поглотиться не могут, так как нижнее состояние (валентная зона) свободно и в нем нет электронов, а верхнее уже заполнено. Следовательно, p-n-переход более прозрачен для фотонов, энергия которых лежит в этом интервале. Излучение возможно только в узком диапазоне частот, соответствующем энергии запрещенной зоны ΔE с шириной спектра, обусловленной δE . В современных светодиодах широко используются полупроводники, в которых в создании излучения существенную роль играют примесные центры (GaP , $GaAs_{1-x}P_x$ и т. д.). По существу, это ловушки, энергетические уровни которых лежат в запрещенной зоне. Возможны следующие механизмы излучательной рекомбинации: носитель заряда захватывается своим примесным центром (электрон – акцепторным, дырка – донорным), а затем он рекомбинирует со свободным носителем заряда противоположного знака;

Электрон и дырка захватываются примесным центром, так что зона вблизи его оказывается в возбужденном состоянии (образуется связанный экситон), после чего осуществляется рекомбинация и пр. Цвет свечения зависит от материала примесей. Так, например, примесные центры из ZnO обеспечивают получение красного свечения, из азота N – зеленое, из ZnO и N – желтое и оранжевое и т. д.

Яркость свечения светодиода примерно пропорциональна числу зарядов, инжектированных p-n-переходом. При этом для получения приемлемых значений необходимо обеспечить значительную плотность тока, протекающего через переход (не менее 30 А/см²).

При обычно используемых размерах это приводит к необходимости пропускать через переход ток порядка 5 – 100 мА, что требует значительных затрат электрической мощности на питание инжекционного диода. При малых токах инжекции (1 – 2 мА) пропорциональность между током и светом нарушается, так как начинают сказываться конкурирующие безызлучательные рекомбинационные процессы.

Основными характеристиками светодиодов являются излучательная и спектральная.

Излучательная (люкс-амперная) характеристика - зависимость потока излучения Φ_e (яркости В) от прямого тока $I_{пр}$ (рис. 2, а). Вид яркостной характеристики зависит от структуры p-n-перехода и области, в которой происходит преимущественная рекомбинация носителей заряда. Участок низкой эффективности свечения при очень малых прямых токах обусловлен значительным вкладом безызлучательной рекомбинации на поверхности и в области объемного заряда, при увеличении тока эти центры рекомбинации «забываются» носителями заряда и их роль ослабевает. Рост напряжения (тока) увеличивает число рекомбинирующих с излучением носителей и яркость возрастает. Дальнейшее увеличение $I_{пр}$ приводит к постепенному насыщению центров люминесценции и снижению излучательной способности диода. Кроме того, с

ростом тока увеличивается вероятность ударной рекомбинации, что также уменьшает излучательную способность.

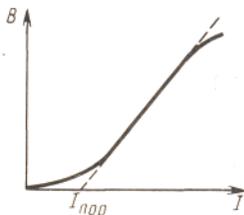


Рис. 2 Яркостная характеристика инжекционного светодиода.

В пределах практически линейного участка зависимости $V(I_{\text{пр}})$ яркость изменяется в 10—100 раз. Этот участок чаще всего и используется в качестве рабочего. В общем случае характеристику аппроксимируют степенной функцией

$$V = bI_D^\gamma,$$

где V —яркость свечения; b —коэффициент пропорциональности; I_D —ток светодиода; $\gamma = 0,5 \div 0,9$ для светодиодов из GaP; $\gamma = 1 \div 3$ для светодиодов из GaAs.

При работе на линейном участке характеристика обычно аппроксимируется выражением

$$V = V_0 (I_D - I_{\text{пор}}),$$

где V_0 — чувствительность по яркости (изменение яркости свечения при изменении тока перехода на единицу); $I_{\text{пор}}$ — пороговый ток через диод, при котором возможна линеаризация характеристики $V = f(I)$. Значения $I_{\text{пор}}$ у диодов разного типа находятся в интервале 0,1 - 2,5 мА.

Ток светодиода, смещенного в прямом направлении, в первом приближении определяется выражением, аналогичным выражению для обычного диода:

$$I_{\text{Д}} = I_{\text{T}} \left(e^{U/(m\varphi_{\text{T}})} - 1 \right).$$

Здесь m — коэффициент, изменяющийся в пределах 0,5—2 (типовое—1,5).

В большинстве случаев при использовании светодиодов в диапазоне комнатных температур зависимостью тока $I_{\text{Д}}$ от температуры окружающей среды пренебрегают. Величина B_0 имеет разные значения от экземпляра к экземпляру.

Зависимость параметров излучения от длины волны излучения называется спектральной характеристикой излучающего диода. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. В связи с разной шириной запрещенной зоны у различных материалов длина волны излучения различна в разных типах излучающих диодов. Так как переход электронов при рекомбинации носителей зарядов обычно происходит не между двумя энергетическими уровнями, а между двумя группами энергетических уровней, то спектр излучения оказывается размытым. Спектральный диапазон излучающего диода характеризуют шириной спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$, измеряемой на высоте 0,5 максимума характеристики. Излучение большинства излучающих диодов близко к квазимонохроматическому ($\Delta\lambda/\lambda_{\text{max}} \ll 1$) и имеет относительно высокую направленность распределения мощности в пространстве.

К основным параметрам СИД относятся: рабочее прямое напряжение, длина волны излучения λ_{max} , сила света (световой поток, приходящейся на единицу телесного угла в заданном

направлении; выражается в канделах, кд), угол излучения θ , квантовая эффективность (КПД) η и др. Остановимся на некоторых из них.

Количественно излучение СИД обычно характеризуют силой излучения. Однако сила излучения зависит от направления излучения. Направленность излучения описывают диаграммой направленности или углом излучения θ . В пределах угла излучения сила излучения составляет не менее половины ее максимального значения. С помощью диаграммы направленности и угла излучения можно определить зрительно воспринимаемый световой поток при взгляде под некоторым углом к геометрической оси излучателя.

Качество излучающего диода характеризуется внешним квантовым выходом

$$\eta = \gamma \eta_{\text{э}} \eta_{\text{опт}}$$

где γ - коэффициент инжекции; $\eta_{\text{э}}$ – внутренний квантовый выход; $\eta_{\text{опт}}$ – оптическая эффективность или коэффициент вывода света.

Произведения $\gamma \eta_{\text{э}}$ определяет эффективность инжекционной электролюминесценции. Однако даже при большом значении $\gamma \eta_{\text{э}}$ внешний квантовый выход может оказаться малым вследствие низкого вывода излучения из структуры диода во внешнюю среду. При выводе излучения из активной области диода имеют место следующие потери энергии:

- 1) потери на самопоглощение;
- 2) потери на полное внутреннее отражение;
- 3) потери на обратное и торцевое излучение.

Эффективность вывода оптического излучения из диода характеризуется коэффициентом вывода $\eta_{\text{опт}}$ и определяется отношением мощности выходящего излучения $P_{\text{изл}}$ к мощности излучения, генерируемого внутри кристалла $P_{\text{ген}}$:

$$\eta_{\text{опт}} = P_{\text{изл}} / P_{\text{ген}}$$

Конструктивное исполнение светодиодов сильно влияет на значение внешнего квантового выхода, а следовательно, и КПД прибора. Из-за высокого коэффициента преломления исходного материала светодиодов большая часть света испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела полупроводник-воздух. В результате из-за многократных переотражений от границ увеличивается поглощение света в полупроводнике и только единицы процентов энергии излучения выходят из светодиодов простейшей плоской конструкции.

Светодиоды на основе фосфида арсенида галлия получают наращиванием эпитаксиального слоя на подложку из арсенида галлия. Излучаемый в области р-п-перехода свет падает на подложку и частично поглощается, что приводит к дополнительным потерям энергии. Эпитаксиальный слой выращивают на прозрачной подложке из фосфида галлия с отражающим нижним покрытием. Это увеличивает выход полезного излучения. Внешний квантовый выход можно также увеличить за счет применения более сложных конструкций светодиодов. На рис.3 приведен пример устройства такого светодиода, у которого п-база 3 выполнена в виде полусферического монокристалла полупроводника, 4 – эмиттер, 5 – переход, 1 и 2 – контакты. Для увеличения КПД светодиодов применяют прозрачные полусферические покрытия из стекла и пластмасс с высоким показателем преломления, просветляющие (прозрачные для излучаемых волн) покрытия внешней поверхности прибора и т.д.

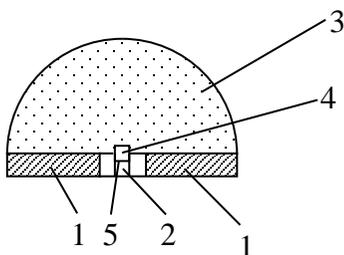


Рис. 3. Конструкция светодиода

Выпускаемые промышленностью светоизлучающие диоды по конструкции могут быть разделены на следующие группы: 1) в металло-стеклянном корпусе; 2) в конструкции с полимерной герметизацией на основе металло-стеклянной ножки или рамочного держателя; 3) бескорпусные диоды.

Диоды в металло-стеклянном корпусе отличаются высокой надежностью и стабильностью параметров, механической и климатической устойчивостью.

Диоды с полимерной герметизацией по некоторым характеристикам имеют преимущества перед диодами в металло-стеклянной конструкции: а) полимерная герметизация в большей степени позволяет осуществить перераспределение света в пространстве как в направлении сужения диаграммы направленности излучения (с увеличением силы света), так и в направлении ее расширения; б) полимерная герметизация увеличивает внешний квантовый выход излучения за счет увеличения угла полного внутреннего отражения на границе кристалл - полимер; в) герметизированные полимерами приборы обладают большей стойкостью к ударным и вибрационным нагрузкам, чем приборы в металло-стеклянных корпусах; г) полимерная герметизация позволяет получить при необходимости малое отношение объема (габарита) прибора к объему (габариту) кристалла; д) полимерная герметизация благодаря своей

технологичности позволяет существенно снизить трудоемкость изготовления приборов и их стоимость.

Бескорпусные диоды – самые миниатюрные светоизлучающие диоды, используемые в герметизируемой аппаратуре.

Конструкции некоторых типов светодиодов представлены на рис. 4.

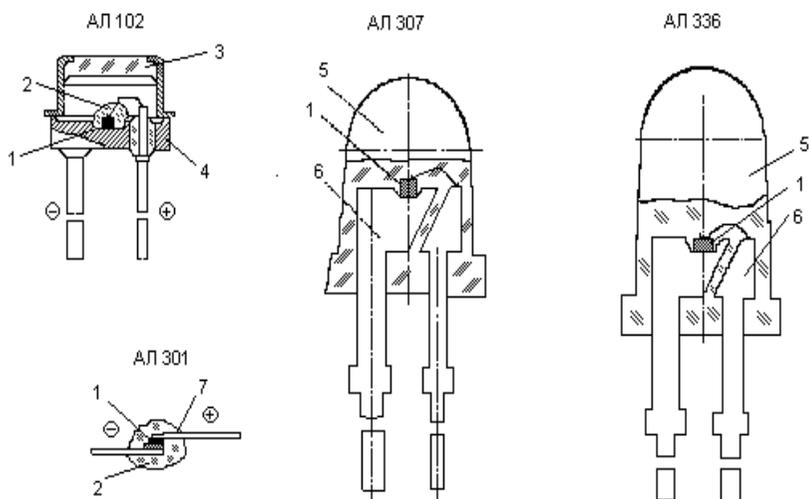


Рис. 4. Устройство некоторых типов СИД: 1- кристалл; 2 - полимерная защита; 3 – баллон с стеклянным окном; 4-металло-стеклянная ножка; 5 – полимерная линза; 6 – держатель; 7 – гибкий золотой вывод

Активным элементом изделия является кристалл, укрепленный на кристаллодержателе.

Кристаллодержатель, светоизлучающего диода содержит, как правило, посадочное место для кристалла с отражающими свет стенками (рис. 5). Отражающие стенки охватывают боковое излучение в угле примерно 45—50°. Они в значительной степени

сужают диаграмму направленности излучения и увеличивают силу света в осевом направлении. Так, размещение GaP кристалла в посадочном месте, показанном на рис. 5, уменьшает полуширину диаграммы направленности излучения с 170° до 120° при увеличении силы света в осевом направлении примерно в 3 раза. Помещение в посадочное место кристалла с непрозрачной подложкой (например, из $\text{Ga}_{0,3}\text{Al}_{0,7}\text{As}$) приводит к несколько меньшему эффекту: сужению диаграммы направленности со 120° до 75° и увеличению осевой силы света примерно в 1,5 раза.

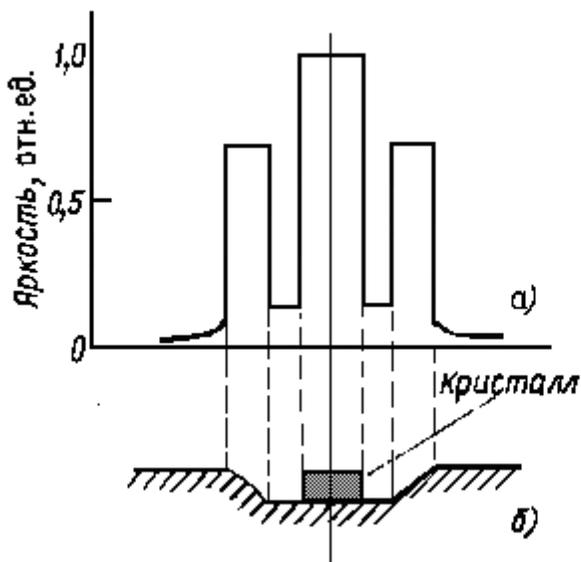


Рис. 5 Распределение яркости по кристаллодержателю диода (а), содержащему посадочное место с отражающими свет стенками (б)

Одновременно с увеличением силы света и сужением диаграммы направленности излучения применение описанного

кристаллодержателя в метало-стеклянных конструкциях приводит к улучшению восприятия излучения за счет увеличения светящейся площади и повышения контрастности. Как видно из рисунка 5, кристалл и светящееся кольцо отражателя разделены более темным кольцом.. Наличие на светящейся поверхности ярких и темных участков увеличивает ее контрастность и способствует лучшему визуальному восприятию.

Значительное перераспределение светового излучения осуществляется полимерной линзой, которая формирует необходимую диаграмму направленности излучения. Форму полимерной линзы выбирают, как правило, такой, что излучающий кристалл располагается между фокусом преломляющей поверхности, образованной полусферической линзой, и центром этой линзы. Фокусное расстояние определяется по формуле

$$f = Rn/(n-1), \quad (1)$$

где R — радиус полусферической полимерной линзы; n — показатель преломления компаунда. Расстояние от центра кристалла до центра сферической поверхности определяется в зависимости от заданной диаграммы направленности излучения.

Расчет оптимальных размеров полимерной линзы для светоизлучающих диодов иллюстрируется рис. 6. Угол вывода излучения по отношению к оси прибора (Q) равен

$$Q = \theta - r + i, \quad (2)$$

где θ - угол между нормалью к поверхности кристалла и световым лучом, r и i - углы падения и отклонения луча. С учетом закона Снелла

$$\sin r = n \sin i, \quad (3)$$

получаем выражение для зависимости угла Q от угла θ и отношения высоты полимерного купола (S) к радиусу полусферы (R) S/R :

$$Q = \theta - \arcsin [n (S R^{-1} - 1) \sin \theta] + \arcsin [(S R^{-1} - 1) \sin \theta] \quad , (4)$$

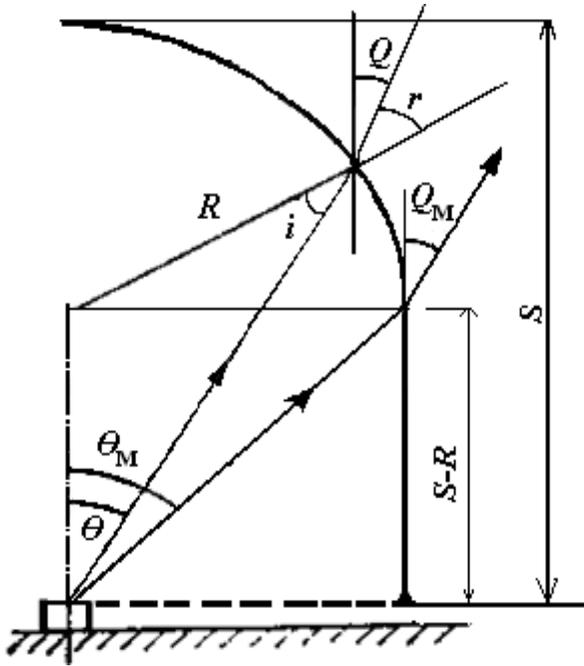


Рис. 6. Ход световых лучей в полимерном куполе светоизлучающего диода: R – радиус полусферы; S – высота полимерного купола; Θ_M – максимальный угол, охватываемый полусферой; Q_M – максимальный угол вывода излучения по отношению к оси прибора; i и r – углы падения и отклонения

Зависимость величины Q_M от S/R приведена на рис. 7. Как видно из рисунка, при $S/R = 1,5$ величина Q_M равна примерно 45° , что является вполне удовлетворительным для сигнальных светоизлучающих диодов. Для диодов с узконаправленным излучением (с углом излучения $5-15^\circ$) наиболее целесообразно использовать величину $S/R = 1,9-2,0$. Конкретные значения S/R обычно подбирают с учетом действия отражателя света и

рассеивающего эффекта, возникающего при введении в компаунд диспергирующего наполнителя.

Для получения узкой диаграммы направленности излучения весьма важно отношение R/r , где r - эффективный радиус светящейся поверхности кристалла. Практически для достижения угла излучения $5 - 15^\circ$ отношение R/r должно превышать 15. Сужение диаграммы направленности сопровождается резким увеличением силы света. Так, для диодов с углом излучения $5 - 15^\circ$ коэффициент оптического усиления (отношение силы света диода к силе света кристалла) достигает 40—60 (GaP) и 80—100 ($\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$). Более высокий коэффициент оптического усиления диодов из $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ обусловлен более узкой исходной диаграммой направленности излучения кристалла.

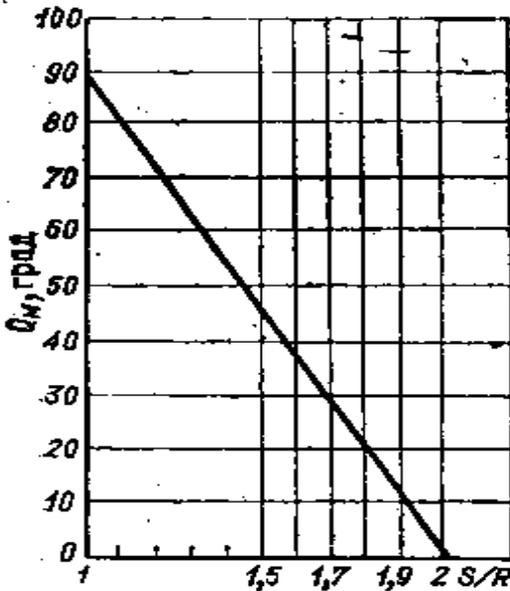


Рис. 7 Зависимость величины Q_M от отношения S/R для полимерного купола, изображенного на рис.5

В качестве материала для полимерной герметизации светоизлучающих диодов в большинстве случаев используется эпоксидный компаунд на основе прозрачной диановой смолы.

Для изготовления сигнальных светоизлучающих диодов, как правило применяется компаунд, диспергированный светорассеивающим наполнителем. Наполнитель позволяет увеличить размер светящегося пятна и расширить диаграмму направленности излучения (увеличить угол излучения). Одновременно он резко понижает интенсивность отраженного диодом внешнего света и, тем самым, снижает эффект отсвечивания для невключенных диодов.

Оптимальным светорассеивающим наполнителем следует считать оптически прозрачный аморфный материал с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления основного вещества. Этому условию хорошо отвечает, например, стекло кварцевое, оптическое, с показателем преломления 1,46, измельченное до частиц размером не более 16 мкм.

Типичные диаграммы направленности некоторых светодиодов изображены на рис. 8.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Функциональная схема установки для измерения угловых зависимостей интенсивности излучения полупроводниковых светодиодов показана на рис. 6. Исследуемый светодиод (1) с учетом знака подводимого напряжения вставляют в зажим (2). Излучение от светодиода попадает на фотоприемник (3), установленный на штанге (4), свободно вращающейся вокруг оси, на которой крепится светодиод. Угол поворота штанги считывается по шкале (5). Фотоприемник (3) является готовым узлом системы дистанционного управления телевизионного приемника и наряду с первичным преобразователем (фотодиодом ФД-263) содержит предварительный усилитель электрического сигнала.

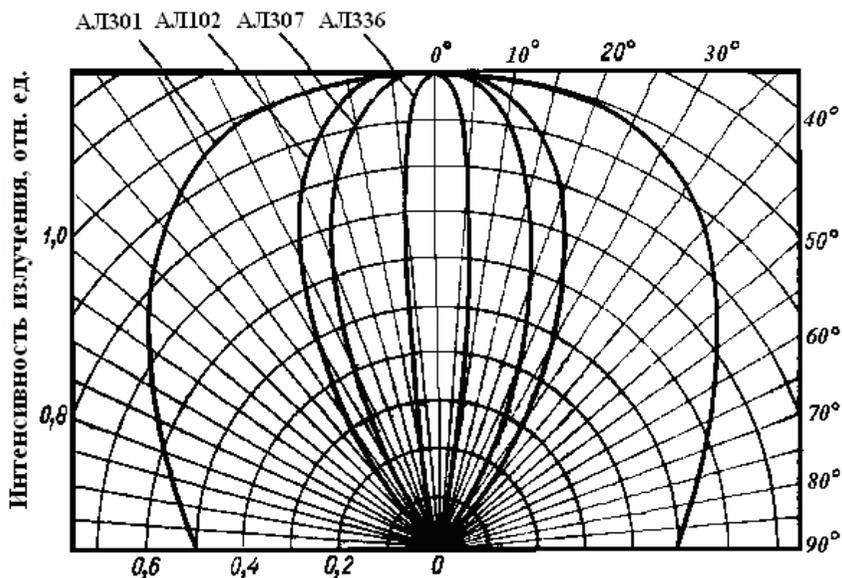


Рис. 8 Типичные диаграммы направленности излучения некоторых типов светоизлучающих диодов

С выхода предварительного усилителя сигнал поступает на синхронный детектор (6). Последний представляет собой электронный ключ, управляемый напряжением, вырабатываемым импульсным генератором (7). При этом имеет место синхронная подача импульса напряжения с генератора на светодиод и на синхронный детектор, чем достигается высокая помехоустойчивость измерительной установки.

После синхронного детектора сигнал поступает на фильтр «низкой частоты» (8), а затем на оконечный усилитель (9), нагрузкой которого является микроамперметр-индикатор (10). Коэффициент усиления усилителя регулируется потенциометром (11), а установка «нуля» индикатора осуществляется потенциометром (12).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

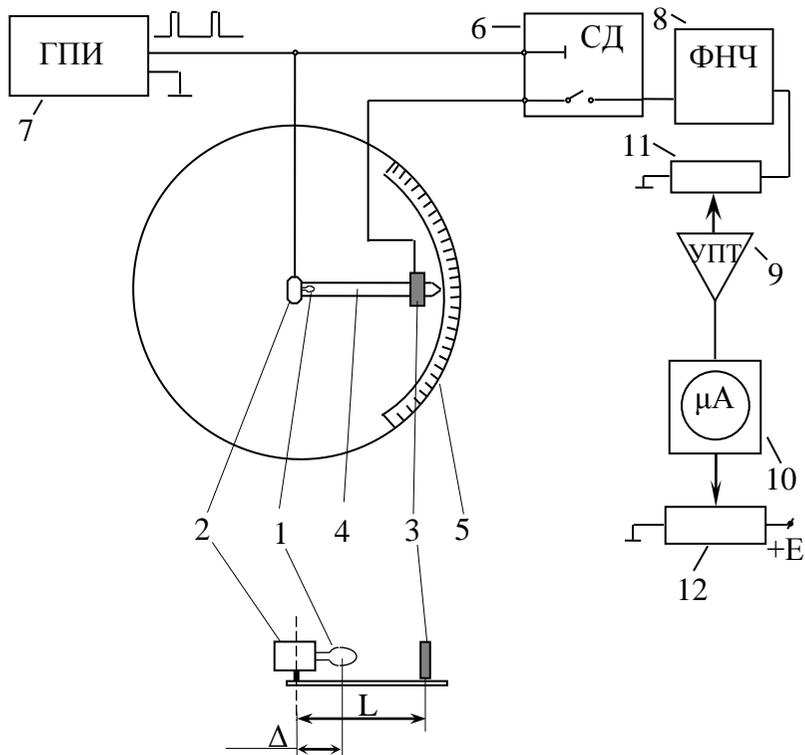


Рис. 9. Функциональная схема измерительной установки

1. Вставить, соблюдая полярность, светодиод (1) в зажим (2).

2. Включить питание измерительного стенда, перевести ручку потенциометра (11) в положение, соответствующее максимальному усилению. Затемнив источник излучения, с помощью потенциометра (12) установить стрелку микроамперметра-индикатора в положение «0».

3. Открыть источник излучения. Установить штангу с фотоприемником в положение, соответствующее 0° шкалы измерителя и, осторожно изменяя угол фиксации светодиода в вертикальном направлении, добиться наибольших показаний микроамперметра. Ручкой потенциометра (11) отрегулировать коэффициент усиления, т. о., чтобы стрелка микроамперметра показывала число «100».

4. Перемещая штангу с фотоприемником, измерить угловую зависимость интенсивности (I) излучения светодиода. (Полученные данные занести в таблицу.)

5. Повторить процедуры, описанные в пунктах 2- для измерения диаграмм направленности остальных светодиодов.

6. Скорректировать угловую зависимость интенсивности с учетом смещения источника излучения из центра круга:

$$\phi = \arctg\{[L\sin(\phi_0) / [L\cos(\phi_0) - \Delta]\}, \quad (5)$$

где L- радиус круга, Δ- смещение источника из центра окружности.

7. Построить зависимости I(φ) для исследуемых светодиодов.

8. Построить диаграммы направленности светодиодов.

9. Определить из экспериментальных результатов значение критического угла Q_m для каждого светодиода.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия полупроводникового светодиода. Объяснить энергетическую диаграмму излучательной рекомбинации.

2. Достоинства СД, по сравнению с другими оптоэлектронными приборами.

3. Излучательная и спектральная характеристика СД..

4. Объяснить разницу между внешней и внутренней квантовой эффективностью. Способы увеличения внешнего квантового выхода.

5. Назвать и дать определение основных параметров светодиодов. Основные материалы используемые для изготовления оптоэлектронных приборов.

6. Виды конструкций светодиодов. Их сравнительная характеристика.

7. Особенности распространения света от активного элемента, закрепленного на кристаллдержателе.

8. Ход световых лучей в полимерном куполе светодиода.

ЛИТЕРАТУРА

1 Л.М. Коган. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоатомиздат 1983 (208 с).

2. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1973

3. В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин.
Полупроводниковые оптоэлектронные приборы.
Справочник.М.: Энергоатомиздат 1989447 (447 с).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: изучить принцип действия рубинового лазера.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд в электронном варианте.

ВВЕДЕНИЕ

Первым квантовым генератором света был рубиновый лазер, созданный в 1960 году. В дальнейшем появилось много других лазерных материалов, но рубин по своим физическим и механическим свойствам остается одним из лучших лазерных материалов.

Рубин – это твердое кристаллическое вещество. Основой его является корунд – диэлектрический кристалл оксида алюминия (Al_2O_3). Рубином он становится тогда, когда небольшую часть атомов Al в этом кристалле заменяют ионы хрома Cr^{3+} . Содержание атомов Cr в кристалле невелико (0,05%). В рубине, обычно употребляемом для лазера, на каждый см^3 кристалла приходится около 10^{19} атомов Cr. Это составляет примерно одну десятитысячную от полного числа атомов. И тем не менее именно с введением атомов Cr кристалл принимает характерный для рубина красный цвет. Цвет кристалла обусловлен расположением энергетических уровней атомов Cr в рубине.

В кристалле на атомы Cr действует сильное электрическое поле, создаваемое атомами O и Al. Вклад самих атомов Cr в это поле ничтожно мал, т. к. мала их концентрация. Поэтому взаимодействие атомов Cr друг с другом очень слабо.

Уровни энергии иона Cr^{3+} , находящегося в кристаллической решётке корунда, существенно отличается от уровней энергии свободного иона Cr^{3+} . Величина электрического поля $E_{кр}$, создаваемого соседними ионами решетки (внутрикристаллическое поле), в месте, где находится ион, изменяет положение его энергетических уровней, а, следовательно, и частоту возможных квантовых переходов. Дефекты кристаллической решетки, в том числе и тепловые колебания ионов, также вызывают случайные местные изменения электрических полей, действующих на разные ионы Cr^{3+} . В результате этого положение энергетических уровней разных ионов несколько различно, и уровни оказываются «размытыми» (рис.1).

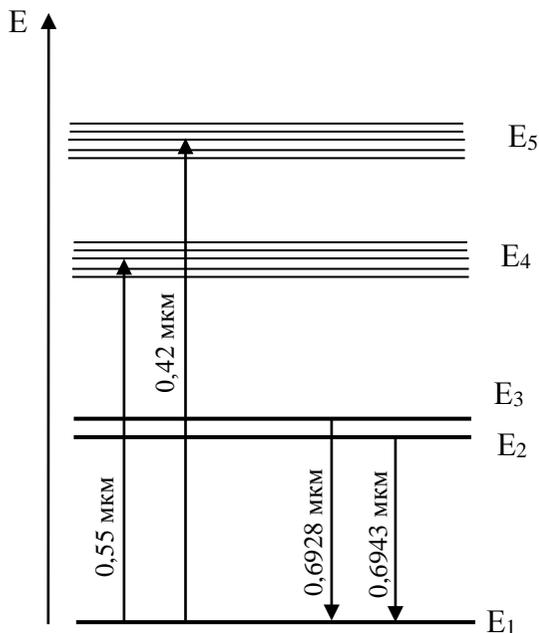


Рис.1 Упрощенная схема энергетических уровней рубина

Некоторые уровни, например E_4 и E_5 , при этом оказываются столь уширенными, что их называют полосами. На положение других уровней (например, E_2) электрическое поле влияет слабее, и их уширение незначительно. Переходы с самого нижнего основного уровня E_1 на широкие полосы E_4 и E_5 соответствуют поглощению зеленого и фиолетового света. Переходы с основных уровней E_1 на низкие уровни E_2 не оказывают влияния на окраску кристалла. Красная составляющая естественного света в рубине практически не поглощается. Т. о., положение и ширина полос поглощения E_4 и E_5 целиком определяют красный цвет рубина.

Структура уровней Cr в рубине показана на рис.1. Из рисунка видно, что имеется основное состояние E_1 и два возбужденных состояния E_2 , E_3 . Это узкие уровни; переходы между ними и уровнем E_1 и используются для генерации света. Основным уровнем E_1 в действительности обладает сложной структурой, особенности которой используются для работы парамагнитных квантовых усилителей и не существенны для работы лазера. Наряду с узкими уровнями E_1 , E_2 и E_3 имеются две сравнительно широкие полосы энергий E_5 и E_4 . Длина волны излучения, соответствующая переходам между уровнями $E_2 - E_1$ 7000 Å. Это – красный свет. Переходы между уровнями полосы E_3 и уровнем E_1 лежат в зеленом интервале спектра, а переход $E_4 - E_1$ – в голубом.

Если атом Cr возбудить, переведя его из основного состояния в полосу E_5 или E_4 , то за очень короткий промежуток времени (10^{-8} с.) он перейдет из этих полос на уровень E_2 или E_3 . При переходе на уровень E_2 атом Cr не излучает. Его энергия тратится на возбуждение колебаний кристаллической решетки

рубина. Возможность возвращения атома из полос E_5 и E_4 снова на уровень E_1 хотя и существует, но скорость этого процесса пренебрежимо мала по сравнению со скоростью перехода атомов на уровни E_2, E_3 . На уровнях E_2 атом «живет» 10^{-3} с., что по атомным масштабам является большим временем. Такое большое время жизни позволяет накапливать атомы на уровнях E_2 , и если достаточно быстро переводить атомы с уровня E_1 в полосы E_5 или E_4 , то на уровень E_2 можно перевести более половины атомов. В таком случае уровень E_2 окажется более населенным, чем уровень E_1 , т. е. возникает инверсия населенности по отношению к переходам с уровней E_2 и E_3 на уровень E_1 .

Переход атомов Cr с уровня E_1 на уровни E_5 и E_4 можно осуществить, заставляя их поглощать свет. Для перевода на них атомов Cr или, как говорят, для накачки рубинового лазера, можно использовать лампы, подобные лампам вспышкам, применяемым в фотографии, только более мощные.

Перевести атомы Cr с помощью накачки непосредственно с уровня E_1 на уровни E_2 нельзя. Выше уже отмечалось, что свет вызывает в веществе одновременно два процесса: поглощение света невозбужденными атомами и вынужденное испускание его возбужденными атомами. Если оба процесса происходят между двумя одинаковыми уровнями, то они протекают с одинаковой скоростью. Поэтому максимум того, что может в этом случае сделать накачка – это уравнивать населенности. В действительности же имеется еще и спонтанное излучение, которое склоняет чашу весов в пользу уровня с меньшей энергией. Т. о., в двухуровневой системе под действием световой накачки получить инверсию населенностей нельзя. Необходим третий уровень как своеобразный «перевалочный пункт».

Наличие широких полос в спектре ионов Cr^{3+} в рубине является «третьим уровнем» - благоприятным обстоятельством для создания лазера. Теоретически, конечно, можно было бы воспользоваться и узким третьим уровнем, но практически

нельзя. Лампа- вспышка испускает свет, близкий к белому, то есть с широким спектром частот. Во всем этом широком частотном интервале мощность лампы может быть весьма значительной, но если из спектра лампы «вырезать» фильтром узкий интервал, то мощность излучения в малом спектральном интервале окажется малой. В таких случаях говорят, что лампа обладает малой спектральной плотностью света, которая соответствует спектральной плотности теплового излучения тела, нагретого до температуры 8000 – 10000 К. Чем больше полоса поглощения атомов в кристалле, тем большая часть световой энергии, испускаемой лампой, используется. Энергетические полосы Cr в рубине позволяют использовать 15% света лампы-вспышки. Узкие энергетические уровни дали бы возможность использовать лишь доли процента.

С другой стороны, переход атомов Cr из широких полос E_5 и E_4 на узкие уровни E_2 и E_3 дает возможность концентрировать атомы в небольшом интервале энергии, что улучшает степень монохроматичности генерируемого света. Из сказанного ясно, что система уровней Cr в рубине весьма благоприятна для создания лазера с помощью накачки мощной лампой-вспышкой.

Выше было показано, что минимально необходимая мощность лампы-вспышки для возбуждения генерации определяется необходимостью перекачать, по крайней мере половину всех атомов (5×10^{18} атом/см³) в возбужденное состояние. В действительности нужно перекачать большее количество частиц. Разность числа частиц $\Delta N = N_2 - N_1$ (число активных частиц) должна превзойти некоторое пороговое значение $\Delta N_{п}$, необходимое для компенсации потерь электромагнитной энергии в системе (рассеяние и поглощение света зеркалами, а также излучение света наружу), в самом же рубине эти потери невелики. При коэффициенте отражения от зеркал $\sim 90\%$ и длине кристалла $\sim 10^{17}$ см пороговое значение разности $\Delta N_{п} \sim 10^{17}$ атомов/см³. Это означает, что к половине атомов Cr, переведенных на верхний уровень ($5 - 3 \times 10^{18}$

атомов/см³), нужно добавить лишь несколько процентов от общего числа частиц, чтобы началась генерация. Поэтому вычисленное ранее значение мощности лампы-вспышки практически достаточно для получения генерации в реальном лазере.

Рубиновый лазер схематически изображен на рис.2. Рубиновый стержень помещается между зеркалами Z_1 и Z_2 . Лампы-вспышки L_1 и L_2 , осуществляющие накачку лазера, размещаются либо вдоль рубинового стержня (рис. 2, а), либо лампа в виде спирали L окружает стержень (рис. 2, б). Рубиновый стержень и лампы окружаются отражающим кожухом для лучшего использования света ламп. Генерация света развивается в пространстве между зеркалами вдоль кристалла рубина.

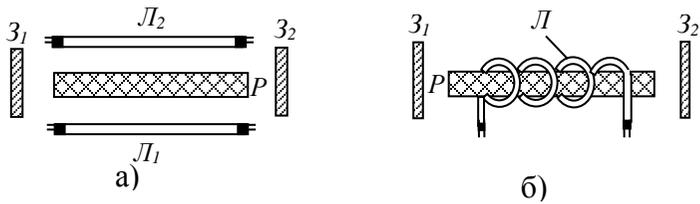


Рис.2 Простейшие типы рубинового лазера

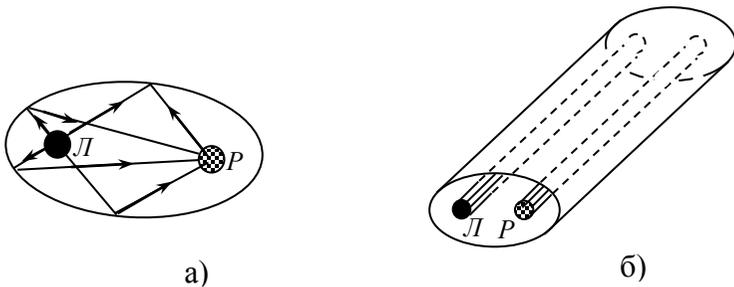


Рис.3 Лазер, у которого рубиновый стержень P

и лампа L расположены в фокальных линиях отражателя – эллиптического цилиндра

Часто в качестве отражателя применяется эллиптический цилиндр (рис. 3), в одной фокальной линии которого помещается лампа-вспышка L , а в другой – рубиновый стержень P . Эллиптический цилиндр фокусирует свет лампы на кристалл P . Этим достигается более эффективное использование света накачки. Иногда для увеличения энергии накачки вместо одной лампы применяют две или четыре. В таком случае используются совмещенные эллиптические отражатели.

К сожалению, не вся энергия, поглощенная рубиновым стержнем, превращается в излучение лазера. Часть ее, и довольно значительная (~50%), тратится на нагревание стержня. Под действием тепла рубиновый стержень изменяет свои геометрические и оптические характеристики, быть может, не заметные глазу, но весьма ощутимые при работе лазера. При нагревании стержня число частиц в полосе 3, равновесное с рабочим уровнем E_2 , возрастает и приток частиц на уровень E_2 в результате накачки компенсируется уходом частиц с уровня E_3 на E_1 за счет релаксации и излучения. Этим обусловлено существование предельной температуры, выше которой лазер перестает работать. Для рубина она ~ 1000К. Поэтому в некоторых конструкциях лазеров предусматривается охлаждение кристалла проточной водой и даже жидким азотом. Для этого стержень рубина помещается в стеклянный сосуд, в котором циркулирует охлаждающая жидкость. КПД твердотельных лазеров составляет несколько процентов и поэтому отвод тепла крайне необходим. Выходная мощность лазера зависит от энергии накачки и имеет пороговую энергию. Выходная мощность может достигать нескольких десятков джоулей в импульсном и порядка ста милливатт в непрерывных режимах.

Обратную связь в оптическом резонаторе можно включать и выключать с помощью устройства управления. Обычно используется электрооптический затвор, например, в виде ячейки Керра или ячейки Поக்கельса, Фарадея. Обратная связь включается на промежуток времени $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с. Это время и определяет длительность импульса. Таким образом, накопленная на метастабильном уровне энергия возбужденных ионов хрома излучает энергию за очень короткий промежуток времени ($\sim 10^{-8}$ с.), что позволяет развить гигантскую мощность. Сфокусированный поток такого излучения обладает гигантской плотностью мощности, способной разрушить любые материалы.

Такие лазерные импульсы получили название гигантских ($\sim 10^{10}$ Вт и более), а конструкции получили название лазеров с модулированной добротностью. Гигантские импульсы можно увеличить по мощности, используя каскад лазерных усилителей. Такая мощность превосходит мощность самых больших электростанций мира.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Создайте возбужденный уровень (**Create excited state band**).
2. Создайте верхний рабочий (метастабильный) уровень (**Create impurity state band**).
3. Включите энергию накачки (**Turn on Pumping Power**).
4. Измените свойства (изменить положение уровней, поменять значение энергии накачки) (**Edit Properties**).
5. Очистить рисунок перед выходом из программы (**Clear All**).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Познакомиться с принципом работы рубинового лазера.
2. Разобраться с методикой работы на виртуальном лазере.

3. Используя для накачки основные полосы поглощения, определить положение рабочих уровней и получить генерируемое излучение с длиной волны $\lambda=0.69$ мкм.

Определить частоту и энергию фотонов соответствующих излучению с данной длиной волны.

Данные представить в виде таблицы. (Константы необходимые для расчетов: $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

4. Меняя значения энергетических уровней получить генерируемое излучение с длиной волны, характерной для красного, желтого, зеленого, синего и фиолетового света.

Вычислить длину волны для каждого цвета. Данные представить в виде таблицы.

| $E_3, \text{эВ}$ | $E_2, \text{эВ}$ | λ | цвет |
|------------------|------------------|-----------|------|
| | | | |

5. Определить длины волн возможного генерируемого излучения при мощности накачки = 2,4 эВ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить принцип работы рубинового лазера.
2. Назовите три необходимых условия генерации излучения.
3. Вид накачки, используемый для рубинового лазера.
4. Объяснить низкий КПД рубинового лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Квантовая электроника. Маленькие энциклопедии. Под ред. С.А.Ахманова и др., Советская энциклопедия, 1969.
- О.Звелто Принципы лазеров, Мир, 1990.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ПАРЫ

Цель работы: Исследование входных, выходных и передаточных характеристик оптрона типа «светодиод-составной транзистор».

Приборы и оборудование: лабораторный стенд, стабилизированный источник постоянного напряжения, электронные универсальные вольтметры и амперметры, оптрон АОТ 127Б.

ВВЕДЕНИЕ

Оптопарой называют оптоэлектронный прибор, содержащий излучатели и фотоприемники, оптически и конструктивно связанные друг с другом.

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 или напряжение. Таким образом, оптрон представляет собой прибор с электрическими входными и выходными сигналами (связь оптрона с внешней схемой электрическая). Внутри оптрона связь входа с выходом осуществляется с помощью оптических сигналов. В электрической схеме такой прибор выполняет функцию выходного элемента – фотоприемника с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входа и выхода. Однако сводить назначение оптрона только к обеспечению электрической изоляции было бы неверно. Введение с помощью оптрона оптического управления позволяет получить элементы электронной схемы с исключительно своеобразными параметрами и характеристиками.

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 и широкой полосе пропускания.

Кроме того, важными достоинствами оптронов являются: возможность бесконтактного (оптического) управления электронными объектами и обусловленные этим разнообразие и гибкость конструкторских решений управления;

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

возможность создания функциональных 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 этого, 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 температурная зависимость параметров;

высокий уровень собственных шумов;

конструктивно-технологическое несовершенство, связанное в основном с использованием гибридной технологии.

Перечисленные недостатки оптронов по мере совершенствования материалов, технологии, схемотехники постепенно устраниаются. Широкое применение оптронов определяется прежде всего неповторимостью достоинств этих приборов.

Излучатель оптрона. Основным и наиболее универсальным излучателем для оптронов может быть и реально является инжекционный светоизлучающий диод. В будущем – для создания сверхбыстродействующих оптронов ($t_{пер} \sim 10^{-9} \div 10^{-10}$ с) и мощных оптронов с протяженным оптическим каналом – применение полупроводниковых лазеров, характеризующихся высоким быстродействием и высокой направленностью излучения, может оказаться целесообразным и экономически оправданным.

Следует подчеркнуть отличия в конструкции оптического окна излучателя оптрона по сравнению с обычным СИД. В СИД излучатель изготавливают с кольцевой излучающей областью вокруг расположенной в центре контактной площадки. В результате видимая область излучения как бы увеличивается на площадь контактной площадки. Для оптрона излучающая область должна быть минимальной по площади, что уменьшает краевые потери излучения. Минимальная площадь излучающей области ограничивается

допустимой плотностью тока через излучатель. Контактная площадка в излучателе оптрона смещается из центра излучающей области. Это создает минимальное затенение и также уменьшает потери излучения при передаче к фотоприемнику. Малый размер излучающей области позволяет обеспечить, кроме того, стабильность условий оптической связи, сделать их практически независимыми от точности совмещения с приемным окном фотоприемника.

Оптический канал. Важным элементом оптопары является оптический канал между излучателем и фотоприемником. Существуют три его разновидности. Прежде всего это простой светопровод, предназначенный для передачи энергии излучения на фотоприемник; чаще всего он выполняется в виде прозрачной *иммерсионной среды*. Возможно и такое конструктивное решение, при котором в зазор между излучателем и приемником имеется доступ извне; в этом случае мы имеем *оптопару с открытым оптическим каналом*. Наконец, иммерсионная среда может быть выполнена из материала, светопропускание которого изменяется при внешних воздействиях; такой прибор называют *оптопарой с управляемым оптическим каналом*.

Качество оптрона в значительной степени зависит от эффективности передачи энергии от *И* к *ФП*, т.е. от свойств оптического канала. Для уменьшения потерь на отражение необходимо создать иммерсионную систему, в которой показатели преломления n оптической среды и материалов излучателя и *ФП* были бы одинаковы. Такая цель принципиально достижима, так как у основных используемых полупроводниковых материалов значения n близки друг к другу.

При выборе типа оптического канала необходимо в зависимости от применения оптрона удовлетворить следующие требования:

- 1) обеспечить заданный уровень электрической изоляции между входом и выходом оптрона (между излучателем и фотоприемником);
- 2) материал оптического канала должен быть согласован с излучателем и фотоприемником спектрально, т.е. обладать высокой прозрачностью для излучения в рабочем диапазоне длин волн;
- 3) потери на отражение на границах излучатель – оптический канал и оптический канал – фотоприемник должны быть минимальными.

При выборе оптического канала требования к изоляции оказываются решающими, если расстояние между излучателем и фотоприемником мало. Если же расстояние достаточно велико, например, при использовании световодов, изолирующие свойства становятся менее важными. Зато большое значение приобретает спектр пропускания оптического канала, который является составной частью спектральной характеристики системы И – ОК – ФП. Мерой согласования спектральных характеристик оптронной системы служит коэффициент спектрального согласования или корреляции k_{λ} .

Принципы, лежащие в основе функционирования светоизлучающих диодов рассматриваются в лабораторной работе № 1, здесь же основное внимание будет уделено явлениям, происходящим в фотоприемнике. Таковыми, в частности, являются полупроводниковые фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры, в которых поглощение световой энергии приводит к генерации электронно-дырочных пар и следовательно, к изменению электрических параметров выходной цепи прибора.

Фотодиод. Фотодиод – это фотоприемник, принцип действия которого основан на фотогальваническом эффекте и фоточувствительный элемент которого имеет структуру полупроводникового диода, сконструированного и оптимизированного так, что его активная структура оказывается способной эффективно воспринимать оптическое излучение.

Практически для этого корпус фотодиода имеет специальное прозрачное окно, за которым располагается фоточувствительная площадка полупроводникового кристалла (рис. 2). Принимаются также меры по устранению с этой площадки затеняющих элементов (непрозрачных металлических электродов), сводятся до минимума толщины вспомогательных слоев полупроводника, ослабляющих фотоэффект, на фоточувствительную поверхность наносятся специальные антиотражающие покрытия и т. п.

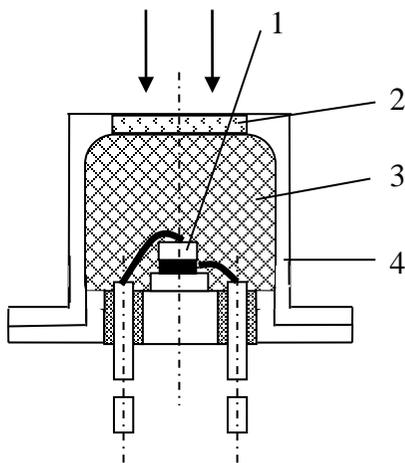


Рис. 2 Общий вид кремниевого $p-i-n$ -фотодиода:
1 – полупроводниковый кристалл; 2 – входное окно; 3 – иммерсионная среда; 4 – металлический корпус.

Упрощенная структура фотодиода изображена на рис. 3. Пусть излучение воздействует в направлении, перпендикулярном плоскости $p-n$ -перехода. В результате

поглощения фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещенной зоны, в n -базе на глубине примерно χ_0 от поверхности полупроводника возникают электронно-дырочные пары (фотоносители).

Фотоносители диффундируют в глубь n -области. Ширина n -области ω такова, что основная доля созданных излучением фотоносителей не успевает рекомбинировать в n -области и доходит до границы p - n -перехода ($x = \omega$). Электроны и дырки разделяются электрическим полем p - n -перехода напряженностью E_0 , при этом дырки переходят в p -область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы p - n -перехода в n -области. Таким образом, ток фотоносителей через p - n -переход обусловлен дрейфом неосновных носителей - дырок.

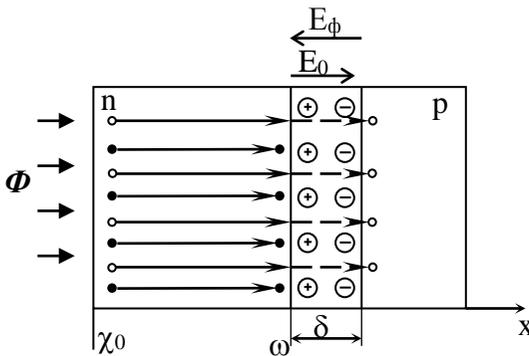


Рис. 3. Структура фотодиода при воздействии излучения

Разделение фотоносителей приводит к снижению внутреннего потенциального барьера в фотодиоде (аналогично приложению прямого напряжения в обычном диоде). Важно подчеркнуть, что в фотодиоде равновесие под действием излучения нарушается в «пользу» дрейфовой составляющей тока через p - n -переход, т.е. для эффективного управления током

с помощью излучения диффузионную составляющую в фотодиоде надо подавлять. В фотодиоде она – паразитная составляющая тока через p - n -переход.

Дрейфовый ток фотоносителей (дырок и электронов) образует фототок I_{Φ} . Дырки «заряжают» p -область положительно относительно n -области, а электроны – n -область отрицательно по отношению к p -области. Возникшая таким образом разность потенциалов, называемая фото-ЭДС E_{Φ} , снижает внутренний потенциальный барьер до значения $\Delta E = E_0 - E_{\Phi}$.

Накопление фотоносителей в соответствующих областях имеет ограничение: одновременно с накоплением (дырок в p -области и электронов в n -области) происходит понижение потенциального барьера E_0 на значение возникшей фото-ЭДС E_{Φ} . Очевидно, что E_{Φ} должна быть меньше E_0 , так как разделение фотоносителей возможно только при наличии некоторого потенциального барьера ΔE . Уменьшение высоты потенциального барьера и соответственно напряженности электрического поля в p - n -переходе ухудшает «разделительные свойства» p - n -перехода.

Для обеспечения высокой чувствительности к излучению необходимо, чтобы в фотодиоде диффузионная составляющая тока была минимальной. Поэтому фотодиод работает или без внешнего напряжения (фотогальванический режим), или при обратном внешнем напряжении (фотодиодный режим).

Фотогальванический режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи фотодиода, т.е. фотодиод работает генератором фото-ЭДС. При этом выражение для тока фотодиода $I_{\Phi д}$ можно записать:

$$I_{\Phi д} = U/R = I_{\Phi} - I_{pn} = I_{\Phi}(\Phi) - I_0(e^{U/\varphi T} - 1) \quad (1)$$

где I_{Φ} – ток фотоносителей (фототок); R – сопротивление нагрузки; I_{pn} – ток p - n -перехода; U – напряжение на диоде; I_0 –

тепловой ток p - n -перехода; φ_T – температурный потенциал; $I_0(e^{U/\varphi_T} - 1)$ – уравнение ВАХ p - n -перехода.

При разомкнутой внешней цепи ($R = \infty$, $I_{\text{фд}} = 0$) имеем $I_{\text{ф}} = I_{\text{рп}}$. Тогда из (1) легко получить напряжение на переходе при холостом ходе, которое равно фото-ЭДС:

$$U_x = \varphi_T \ln(1 + I_{\text{ф}}/I_0) \quad (2)$$

При коротком замыкании в фотодиода ($R = 0$) напряжение на нем $U = 0$, а ток фотодиода $I_{\text{фд}} = I_{\text{ф}}$.

В фотодиодном режиме потенциальный барьер возрастает, и ток через переход $I_{\text{рп}}$ будет определяться током I_0 , который протекает в отсутствие излучения. Ток фотодиода при этом

$$I_{\text{фд}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{рп}} = I_{\text{ф}} + I_0 \approx I_{\text{ф}} \quad (3)$$

Основные характеристики и параметры фотодиода

1) Рассмотрим вольт-амперную характеристику фотодиода.

В общем случае (при любой полярности U) ток фотодиода описывается выражением (1). Это выражение представляет собой зависимость тока фотодиода $I_{\text{фд}}$ от напряжения на фотодиоде U при разных значениях потока излучения Φ , т.е. является уравнением семейства ВАХ фотодиода. Графики ВАХ приведены на рис. 4.

Семейство ВАХ фотодиода расположено в квадрантах I , III и IV . Квадрант I – это не рабочая область для фотодиода: в этом квадранте p - n -переходу прикладывается прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок ($I_{\text{рп}} \gg I_{\text{ф}}$). Фотоуправление током через диод становится невозможным.

Квадрант III – это фотодиодная область работы фотодиода, т.е. к p - n переходу прикладывается обратное напряжение. В этом случае протекающий через p - n переход ток

будет равен $I_{\phi} + I_0 \approx I_{\phi}$. Следует подчеркнуть, что в рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от обратного напряжения, но воздействие излучения существенно.

Квадрант IV семейства ВАХ фотодиода соответствует фотогальваническому режиму работы фотодиода. По точкам пересечения ВАХ с осью напряжения можно определить значения фото-ЭДС (напряжения холостого хода $R = \infty$) при разных потоках Φ . Точки пересечения вольт-амперных характеристик с осью токов соответствуют значениям токов короткого замыкания ($R=0$).

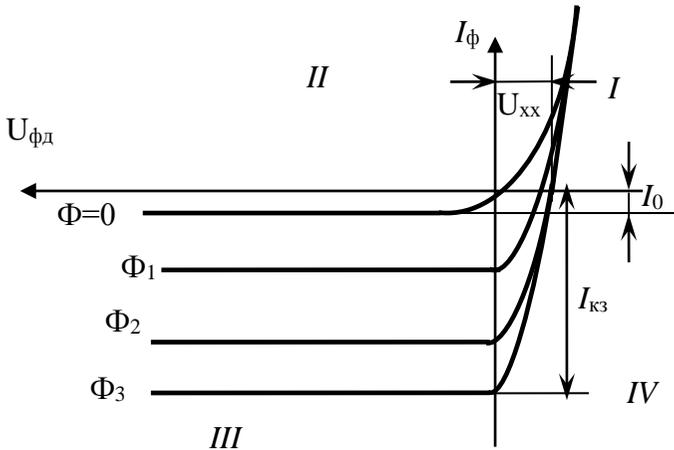


Рис. 4 Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода

2) Рассмотрим связь тока $I_{\text{ф}}$ с потоком Φ , падающим на поверхность фотодиода, - энергетическую характеристику.

Поток излучения Φ – мощность излучения, приходящаяся на всю поверхность n -области полупроводника. Поэтому число фотонов, приходящих в единицу времени на всю поверхность, равно $\Phi/h\nu$. Очевидно, что $I_{\text{ф}}$ пропорционален числу фотонов, поглощаемых в полупроводнике в единицу времени, т.е.

$$I_{\text{ф}} = q\eta\gamma_{\text{б}}\Phi/h\nu \quad (4)$$

где η - внутренний квантовый выход, т.е. число электронно-дырочных пар, образуемых одним фотоном; $\gamma_{\text{б}}$ – коэффициент переноса, учитывающий долю непрорекомбинировавших в базе носителей заряда от общего количества носителей, возникающих под действием излучения.

В фотодиодном режиме энергетическая характеристика описывается выражением (4) и в рабочем диапазоне значений потока излучения линейна. Это говорит о том, что практически все фотоносители доходят до p - n -перехода и принимают участие в образовании фототока. Во всяком случае, потери неосновных носителей на рекомбинацию не зависят от потока излучения. Так как исходный материал содержит малое количество примесей, могущих выполнять роль рекомбинационных центров.

В фотогальваническом режиме энергетические характеристики представляются зависимостями либо тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$, либо фото-ЭДС $E_{\text{ф}} = U_{\text{х}}$ от потока излучения. При больших потоках Φ закон изменения этих зависимостей существенно отклоняется от линейного (рис. 5). Для функции $I_{\text{к}} = f(\Phi)$ появление нелинейности связано прежде всего с ростом падения напряжения на объемном сопротивлении базы фотодиода $r_{\text{б}}$. Снижение фото-ЭДС $U_{\text{х}}$

объясняется уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов в n -области и дырок в p -области; как следствие этого процесса, поле p - n -перехода хуже разделяет фотоносители, и рост фото-ЭДС при увеличении потока излучения замедляется.

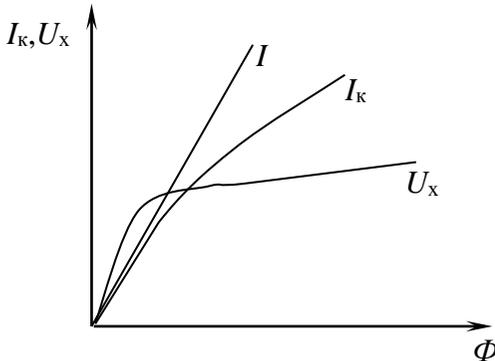


Рис. 5 Световые характеристики фотодиода в фотодиодном и фотогальваническом режимах (I_k, U_x)

3) Из (4), воспользовавшись известным соотношением $v=c_0/\lambda$, можно получить спектральную характеристику.

$$S_\phi = I_\phi / \Phi = q \eta \gamma_B \lambda / h c_0, \quad (5)$$

где c_0 - скорость света. Из (5) следует, что спектральная характеристика, во-первых, линейна, во-вторых, проходит через начало координат. (см. рис. 6).

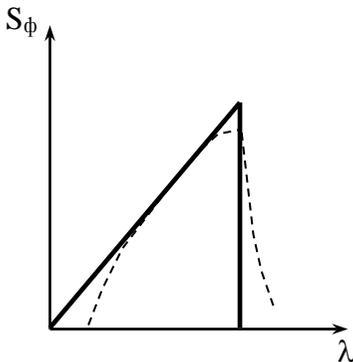


Рис.6 Спектральная характеристика фотодиода.

Реальная спектральная характеристика, изображенная на рис. 6 пунктиром, отклоняется от выражения (5). Снижение чувствительности в области коротких волн связано с тем, что при уменьшении длины волны энергия излучения поглощается в тонком приповерхностном слое, где скорость рекомбинации за счет ловушек значительно больше, чем в глубине материала. Таким образом. Коротковолновая граница чувствительности фотодиода зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшая толщину базы и скорость рекомбинации можно сдвигать коротковолновую границу чувствительности фотодиода в сторону уменьшения длины волны. Спад чувствительности в области длинных волн соответствует длинноволновой границе спектральной чувствительности материала.

Фототранзистор. В качестве фотоприемников применяются транзисторные структуры. Простейший фототранзистор имеет два *p-n*-перехода: эмиттерный и коллекторный. Фототранзистор можно рассматривать как комбинацию фотодиода и транзистора. Его характеристики аналогичны характеристикам фотодиода, но соответствующие токи оказываются усиленными, поэтому масштаб по оси токов увеличен в соответствующее число раз.

Напряжения питания на транзистор подают так же, как и на обычный биполярный транзистор, т. е. эмиттерный переход смещают в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. Часто применяют включение, когда напряжение прикладывается только между коллектором и эмиттером, а вывод базы остается оторванным. Такое включение называется включением с плавающей базой и характерно только для

фототранзисторов. При включении с плавающей базой фототранзистор всегда находится в активном режиме, однако при $\Phi = 0$ протекающий через него ток невелик. Этот темновой ток коллектора транзистора обозначают I_{TK}^{\ominus} .

Устройство и схема включения биполярного фототранзистора показаны на рис.5. Фототранзистор состоит из эмиттерной области p^+ типа 1, области базы n - типа 2, большая часть которой пассивна и открыта световому потоку, широкой коллекторной области p - типа 3. Пассивная часть базы расположена на рис. 5 слева от штрихпунктирной линии. Фототранзистор, как правило, включается по схеме ОЭ с резистором нагрузки R_H в коллекторной цепи (рис. 6). Входным сигналом фототранзистора является модулированный световой поток, а выходным – изменение напряжения на его коллекторе.

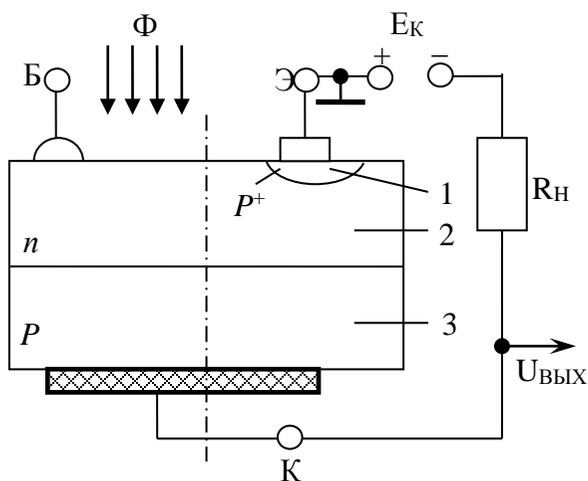


Рис. 6 Фототранзистор, включенный по схеме ОЭ с резистором нагрузки R_H в коллекторной цепи

Рассмотрим принцип работы фототранзистора в схеме с разорванной цепью базы. Оптический сигнал генерирует в коллекторном переходе и области пассивной базы носители. Эти носители диффундируют в базе к коллекторному переходу и разделяются его электрическим полем. Неосновные носители создают фототок коллекторного перехода, а основные накапливаются в базе и компенсируют заряд неподвижных ионов примесей на границе эмиттерного перехода. Потенциальный барьер перехода снижается, что усиливает инжекцию носителей из эмиттера в базу. Инжектированные носители диффундируют через базу к коллекторному переходу и втягиваются его электрическим полем в область коллектора. Ток инжектированных носителей, а соответственно и образованный ими коллекторный ток многократно превышает фототок оптически генерируемых носителей.

Общий ток коллектора – это сумма фототока $I_{\text{фб}}$ и тока $I_{\text{кр}}$ инжектированных эмиттером дырок, прошедших эмиттерный переход. Коэффициент усиления фототока $M=(I_{\text{фб}}+I_{\text{кр}})/I_{\text{фб}}=\beta+1$, если $R_H \rightarrow 0$, где β - статический коэффициент передачи по току транзистора в схеме с ОЭ. Усиленный в M раз фототок создает падение напряжения на резисторе нагрузки R_H , изменяя напряжение коллектора на $\Delta U \approx (\beta+1)I_{\text{фб}}R_H$. Из этого соотношения следует, что фототранзистор можно представить в виде эквивалентного фотодиода VD и усилительного транзистора VT (рис. 7, а). Эквивалентный фотодиод образован пассивной базой и областью коллектора слева от штрихпунктирной линии на рис. 5, структура усилительного транзистора расположена справа от этой линии. Транзистор увеличил чувствительность эквивалентного фотодиода в $(\beta+1)$ раз.

Основные характеристики фототранзистора.

1. Вольт-амперные характеристики напоминают выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с

ОЭ (рис. 7, б), только параметром служит не ток базы I_b , а световой поток Φ или фототок $I_{\phi k}$ (при $I_b = \text{const}$).

2. Энергетические характеристики и спектральные характеристики подобны характеристикам фотодиода.

Световая характеристика фототранзистора – зависимость тока коллектора от светового потока $I_k = \psi(\Phi)$ – линейна только при малых потоках. С увеличением светового потока и ростом концентрации неравновесных носителей в базе повышается вероятность их рекомбинации, снижаются коэффициенты переноса и инжекции фототранзистора. Прямо пропорциональная зависимость коллекторного тока от светового потока нарушается.

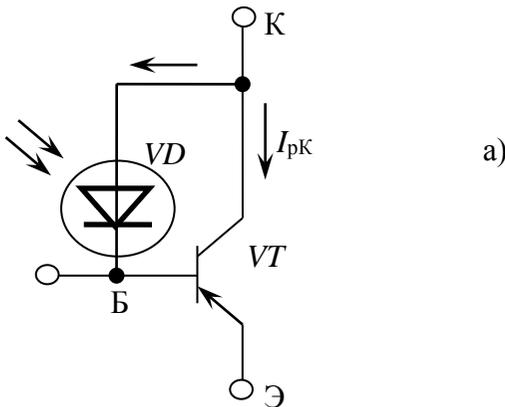


Рис. 7 Эквивалентная схема фототранзистора (а); семейство выходных характеристик фототранзистора в схеме с ОЭ (б).

Структура составного фототранзистора позволяет многократно увеличить чувствительность по сравнению с фотодиодом. Эквивалентная схема структуры показана на рис. 8. В нее входит фототранзистор $VT1$ и совмещенный с ним по коллекторной области усилительный транзистор $VT2$. В структуре эмиттер фототранзистора $\mathcal{E}1$ соединен с базой усилительного транзистора. Коллекторный ток составного фототранзистора определяется соотношением

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 I_{\Phi B1} + \beta_2 I_{B2} = \beta_1 I_{\Phi B1} + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{\Phi B1}, \quad (6)$$

где β_1, β_2 – статические коэффициенты передачи по току транзисторов $VT1, VT2$.

Коэффициент усиления составного фототранзистора по току

$$M_1 = I_K / I_{\Phi B1} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2. \quad (7)$$

Чувствительность составного фототранзистора на 3-4 порядка выше, чем эквивалентного фотодиода. Типовое значение постоянной времени – десятки микросекунд. У составного фототранзистора невысокая температурная стабильность режима работы. Он в (β_2+1) раз чувствительнее к изменениям температуры, чем обычный фототранзистор. Световая характеристика $I_K=\psi(\Phi)$ составного фототранзистора линейна только при малых потоках. С увеличением светового потока растут токи базы транзисторов $VT1$ и $VT2$, а

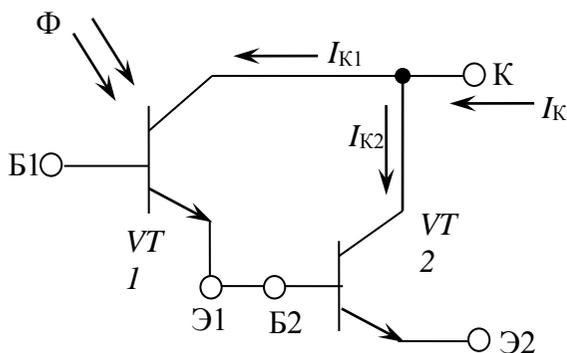


Рис 8 Эквивалентная схема составного фототранзистора коэффициенты передачи по току уменьшаются. В результате линейность зависимости $I_K=\psi(\Phi)$ нарушается.

По степени сложности структурной схемы оптрона и типу оптического канала различают следующие классы оптронов:

1) оптопары – оптроны, состоящие из излучателя и фотоприемника, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция;

2) оптоэлектронные интегральные микросхемы (ОИС) – интегральные микросхемы, содержащие в своем составе одну или несколько оптопар;

3) специальные оптроны обычно содержат излучатель (или излучатели) и фотоприемник (или фотоприемники) и имеют особую конструкцию оптического канала.

Классификации современных оптронов приведена на рис.8. В основу классификации оптопар закладывается тип используемого фотоприемника. При этом различают резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары. Специальные оптроны отличаются видом оптического канала.

Передаточные параметры оптопары. Основным параметром, который характеризует передачу сигнала со входа оптопары на ее выход для всех типов оптопар (кроме тиристорных), является коэффициент передачи по току k_I , т.е. отношение тока на выходе оптопары $I_{\text{ВЫХ}}$ к входному току $I_{\text{ВХ}}$:

$$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} \quad (8)$$

В оптоэлектронике коэффициент передачи по току k_I обычно выражается в процентах и приводится в паспортных данных для оптопар.

Зависимость $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$, которая называется передаточной характеристикой, в общем случае нелинейна для оптопар. При этом различают статический коэффициент передачи k_I , который определяется по формулам (3.3а) и (3.3б), и дифференциальный коэффициент передачи $k_{Iд}$:

$$K_{Iд} = \lim_{\Delta I_{\text{ВХ}} \rightarrow 0} \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}} = dI_{\text{ВЫХ}} / dI_{\text{ВХ}} \quad (9)$$

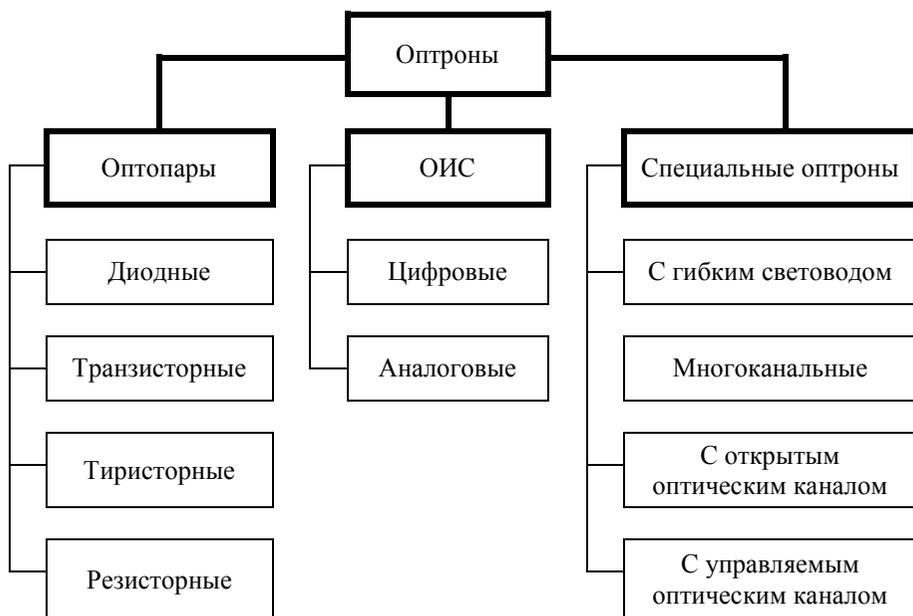


Рис. 8 Классификация оптронов

Таким образом, статический коэффициент передачи по току k_I пропорционален тангенсу угла α наклона прямой, проведенной из начала координат в данную точку передаточной характеристики оптопары $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ – рис 9, т.е. $k_I = \text{tg}\alpha$

Дифференциальный коэффициент передачи k_{Id} пропорционален тангенсу угла β наклона касательной в данной точке передаточной характеристики оптопары (рис.9), т.е. $k_{Id} = \text{tg}\beta$.

Нелинейность передаточной характеристики говорит о том, что коэффициент передачи непостоянен, т.е. изменяется при изменении входного тока. Это связано с нелинейностью излучательной характеристики излучателя оптопары, а также с зависимостью коэффициента передачи по току транзисторов усилителя от выходного тока.

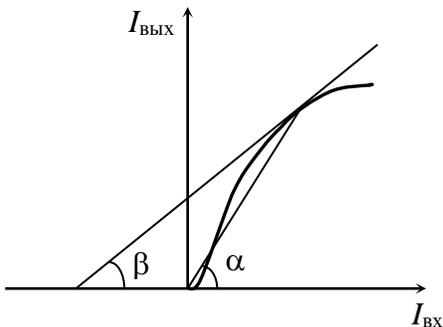


Рис. 9 К определению статического и дифференциального коэффициентов передачи по току оптопары

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый в данной лабораторной работе прибор представляет собой транзисторную оптопару. Излучатель - мезаэпитаксиальный диод на основе твердого раствора галлий-алюминий-мышьяк, приемник - кремневый планарно-эпитаксиальный составной транзистор.

Лабораторный макет для измерения входных и выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) оптоэлектронных приборов показан на рис. 9.

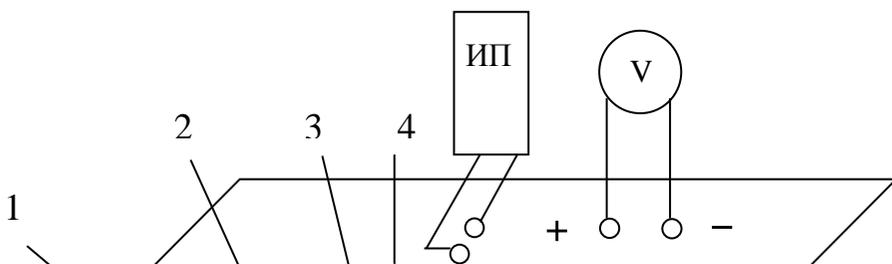


Рис. 9 Лабораторный макет для измерения входных и выходных вольт-амперных характеристик оптопары

Ток светодиода задается с помощью потенциометра (6) и контролируется амперметром (A_1). Посредством вольтметра (V) измеряется напряжение, действующее во входной (U_{CD}) или выходной (U_B , U_K) цепи, в зависимости от указаний тумблера «5». Ток коллектора задается потенциометром (7) и измеряют амперметром (A_2).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить измерительные приборы к лабораторному макету, как показано на рис. 9.

2. Изменяя ток в цепи светодиода ($I_{сд}$) от 0 до 8 мА (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 мА) измерить $U_{сд}$ и получить входную ВАХ оптопары, т.е. $I_{сд}(U_{сд})$.

3 Найдите зависимость напряжения U_B от входного тока $I_{сд}$.

По полученным результатам построить графики $U_{БЭ}(I_{сд})$ и $U_{БЭ}(\ln I_{сд})$.

4. Измерить выходные ВАХ $I_K(U_K)$ при различных значениях входного тока ($I_{сд}=0; 0,5; 0,7; 1, 1.5, 2, 3, 4$ мА). Напряжение $U_{КЭ}$ менять от 0 до 2 В через 0.1 В.

По полученным результатам построить зависимости $I_K(U_K)$ при различных значениях $I_{сд}$ и определить ток светодиода при котором выходные характеристики не линейны.

5. Измерить выходные ВАХ $I_K(I_{сд})$ при различных значениях входного тока ($I_{сд}=0; 0,5; 0,7; 1, 1.5, 2, 3, 4$ мА) и U_K 0.5, 0.6, 0.7 В.

По полученным результатам построить передаточную характеристику $I_{ВЫХ}(I_{ВХ})$ при трех значениях выходного напряжения.

Рассчитать статический коэффициент передачи по току $k=I_{ВЫХ}/I_{ВХ}$ при $U_{КЭ}=0.7$ В для всех значений входного тока и построить зависимость $k(I_{сд})$.

5. Экспериментальные данные представить в виде таблиц и графиков.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение оптопары и оптрона. Достоинства и недостатки оптронов.
2. Виды и свойства оптического канала.
3. Особенности источников излучения в оптронах.
4. Принцип работы фотодиода.
5. Характеристики и параметры фотодиода.
6. Принцип работы фототранзистора. Дать определение коэффициента усиления фототока.
7. Основные характеристики и параметры фототранзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Том 2. М.: Мир. 1984
2. В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. Справочник. М.: Энергоатомиздат 1989 (447 с).
3. Ю.Р. Носов Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989, 360.
4. Дулин В.Н. и др. Электронные приборы: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989, 496.

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: исследовать принцип работы фоторезистора и определить время жизни неосновных носителей заряда.

Приборы и оборудование: лабораторный стенд, генератор Гб-, осциллограф, источник питания.

В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения (эффект фотопроводимости). Основным элементом их является полупроводниковая пленка, сопротивление которой при освещении изменяется.

Оптическое излучение при взаимодействии с кристаллом полупроводника частично поглощается, частично отражается от его поверхности или проходит через кристалл без поглощения. Доли проходящей, отраженной и поглощенной энергии излучения оцениваются для полупроводниковых материалов соответствующими коэффициентами. Различают коэффициент пропускания T_{ϕ} – отношение мощности $P_{\text{пр}}$, прошедшей через кристалл полупроводника, к мощности падающего излучения на его поверхность $P_{\text{пд}}$; коэффициент отражения R_{ϕ} – отношение отраженной мощности $P_{\text{отр}}$ от поверхности кристалла к мощности падающего излучения $P_{\text{пд}}$; коэффициент поглощения α_{ϕ} (см^{-1}), численно равный значению обратного расстояния от поверхности полупроводника, на котором первоначальная мощность падающего излучения уменьшается в e раз.

Коэффициент поглощения α_{ϕ} является постоянной уменьшения мощности излучения по координате x , направленной в глубь полупроводника, нормально к его поверхности, т.е. $dP/dx = -\alpha_{\phi} P$. Тогда

$$P(x) = P_{\text{пд}}(0) e^{-\alpha_{\phi} x} \quad (1)$$

где $P_{\text{пд}}(0)$ – мощность излучения, падающего на поверхность полупроводника, Вт.

Число фотонов, падающих на единицу поверхности полупроводника в 1 с при монохроматическом световом потоке,

называется плотностью фотонов N_0 . С учетом плотности световой поток записывается в виде $\Phi = h\nu N_0$. Световой поток, взаимодействующий с кристаллом, учитывая коэффициент отражения R_ϕ , определяется как

$$\Phi(x) = (1 - R_\phi) h\nu N_0 \exp(-\alpha_\phi x). \quad (2)$$

Изменение плотности поглощенных фотонов с глубиной x находим из выражения

$$dN/dx = -(1 - R_\phi) N_0 \exp(-\alpha_\phi x). \quad (3)$$

где знак «-» указывает, что плотность фотонов убывает с глубиной x из-за поглощения.

Отраженное от поверхности кристалла излучение исключается из процесса взаимодействия с полупроводником. В фотоэлектрических приборах стремятся снизить долю отраженной энергии, уменьшая коэффициент отражения, и повысить долю поглощенной, увеличивая коэффициент поглощения, так как только поглощенная энергия вызывает генерацию свободных носителей в полупроводниках. Один из способов уменьшения коэффициента отражения заключается в изменении условий отражения электромагнитной волны от поверхности кристалла. Если необходимо уменьшить коэффициент отражения на одной частоте или в спектре частот излучения, на поверхность кристалла наносят один или соответственно несколько слоев просветляющего покрытия. В качестве просветляющих покрытий используют кварцевую пленку, монооксид кремния SiO (коэффициент преломления $n=1,9$), сульфид цинк ZnS ($n=2,2$), фтористый магний MgF_2 ($n=1,35$).

Механизм возникновения фотопроводимости можно объяснить следующим образом. В затемненном полупроводнике в результате воздействия тепловой энергии имеется небольшое

количество подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Соответственно полупроводник обладает начальной проводимостью σ_0 , которая носит название темновой:

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p), \quad (4)$$

где q — заряд электрода; μ_n , μ_p — подвижность электронов и дырок; n_0 , p_0 — концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в равновесном состоянии. Под действием света концентрация подвижных носителей заряда увеличивается, причем возможны различные механизмы их генерации.

В полупроводниках различают несколько видов поглощения энергии излучения – собственное, примесное, экситонное, решеточное и т.д. В зависимости от механизма поглощения носителей различают примесную и собственную фотопроводимость.

При собственном поглощении энергия затрачивается на разрыв валентной связи в атоме и перевод электрона из валентной зоны полупроводника в зону проводимости. Для этого необходимо, чтобы энергия фотона превышала ширину запрещенной зоны, т.е. $E_{\text{ф}}=h\nu \geq \Delta E_3$. На частотах излучения $\nu < \nu_{\text{гр}}$, где $\nu_{\text{гр}}=\Delta E_3/h$, коэффициент поглощения резко уменьшается. Поэтому спектр собственного поглощения имеет четко выраженную границу, называемую красной линией фотоэффекта и определяемую соотношением $\lambda_{\text{гр}}=ch/\Delta E_3$. Красная граница соответствует минимальной энергии фотона, необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Граница собственного поглощения $\lambda_{\text{гр}}= c/\nu_{\text{гр}}$ большинства полупроводников приходится на видимую или инфракрасную часть оптического диапазона. На величину $\lambda_{\text{гр}}$ кроме типа полупроводника влияют температура, внешние поля, степень легирования и др. С увеличением температуры ширина запрещенной зоны большинства полупроводников уменьшается и $\lambda_{\text{гр}}$ сдвигается в сторону больших длин волн.

При примесном поглощении энергия фотона затрачивается на ионизацию атомов примеси. В полупроводниках донорные примеси расположены вблизи дна зоны проводимости, акцепторные – около потолка валентной зоны. В обоих случаях энергия ионизации примесей $\delta E_{пр} \ll E_3$, а коэффициент примесного поглощения на несколько порядков меньше собственного и не превышает $\alpha_{ф} = 10^3 \text{ см}^{-1}$. Спектр примесного поглощения смещен относительно спектра собственного в инфракрасную область. Электроны в атомах примесей могут находиться в основном и возбужденном состояниях, и тогда энергия ионизации атомов примесей различна. Увеличение температуры способствует термической ионизации примесей. Коэффициент примесного поглощения при этом уменьшается, так как энергия фотонов не поглощается из-за отсутствия неионизированных атомов примеси. Поэтому приемники инфракрасного диапазона, использующие в работе примесное поглощение, как правило, охлаждают до низких температур (77, 110 К).

Таким образом, в полупроводнике при облучении светом концентрация подвижных носителей заряда увеличивается на величину Δn и Δp и проводимость его резко возрастает:

$$\sigma = q[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p], \quad (5)$$

Изменение электропроводности полупроводника под действием света и есть его фотопроводимость:

$$\sigma_{\phi} = \sigma - \sigma_0 = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p). \quad (6)$$

Меняя яркость освещения, изменяют фотопроводимость полупроводника.

При включении потока облучающего света интенсивность процесса генерации носителей заряда не сразу достигает стационарного значения, соответствующего

интенсивности падающего излучения, а нарастает со временем по экспоненциальному закону

$$\Delta n(t) = \alpha\beta\tau N(1 - e^{-t/\tau}), \quad (7)$$

где N - число фотонов, падающих в секунду на единицу площади; α — коэффициент поглощения, характеризующий энергию, поглощенную полупроводником; β — квантовый выход, определяющий число носителей заряда, образующихся при поглощении одного фотона; τ — время жизни неравновесных носителей заряда.

Если время облучения достаточно велико: $t \geq (3 \div 5) \tau$, - то концентрация неравновесных носителей заряда достигает своего стационарного значения, причем, когда электроны и дырки образуются парами при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости (собственное поглощение энергии полупроводником), то число неравновесных дырок равно числу неравновесных электронов:

$$\Delta n_{CT} = \Delta p_{CT} = \alpha\beta\tau N. \quad (8)$$

При примесном поглощении, когда генерируются в основном носители заряда одного знака, имеет место или электронная, или дырочная фотопроводимость, причем в переходных режимах она также изменяется по экспоненциальному закону.

Если выключить облучающий поток света, то изменение концентрации неравновесных носителей заряда при $\Delta n \ll (n_0 + p_0)$ описывается выражением

$$\Delta n(t) = \Delta n_{CT} e^{-t/\tau}. \quad (9)$$

Явление постепенного изменения σ_{ϕ} при включении и выключении облучающего потока называют релаксацией фотопроводимости.

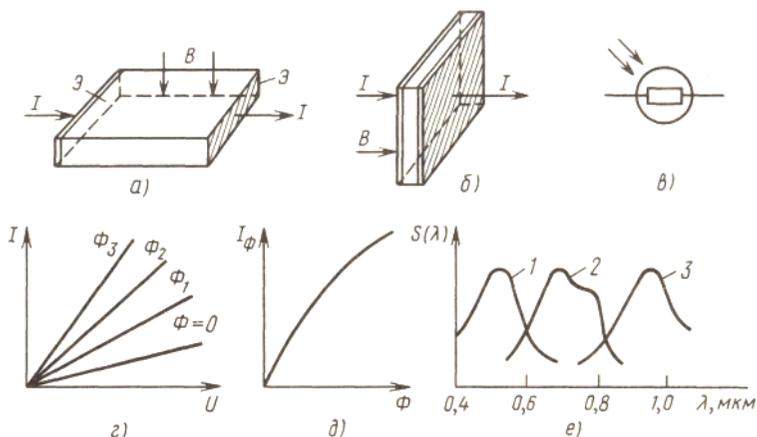


Рис. 1. Конструкция фоторезисторов: *a* – поперечная, *б* – продольная, *в* – условное обозначение, *г* – вольт-амперные; *д* – энергетические; *е* – относительные спектральные характеристики

Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электропроводные электроды. Принципиально возможны две конструкции фоторезисторов: поперечная (рис. 1, *a*) и продольная (рис. 1, *б*).

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 МГц. Продольный фоторезистор из-за конструктивных

особенностей имеет значительную электрическую емкость, которая не позволяет считать фоторезистор чисто омическим сопротивлением на частотах уже в сотни — тысячи Гц.

В качестве исходного материала фоторезистора чаще всего используются сернистый таллий, селенистый теллур, сернистый висмут, сернистый свинец, теллуристый свинец, сернистый кадмий и т. д. Условное обозначение фоторезистора приведено на рис. 1, в.

Основные характеристики и параметры фоторезистора.

1. Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока I через фоторезистор от напряжения U , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока Φ (рис. 1, г). Ток при $\Phi = 0$ называется темновым током I_T , при $\Phi > 0$ – общим током $I_{общ}$. Разность этих токов равна фототоку:

$$I_{\Phi} = I_{общ} - I_T. \quad (10)$$

2. Энергетическая характеристика - это зависимость фототока (фоторезистора) от светового потока при $U = \text{const}$ (рис. 1, д). В области малых Φ она линейная, а при увеличении Φ рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности рекомбинаций носителей заряда через ловушки и уменьшения их времени жизни. Энергетическая характеристика иногда называется люкс-амперной. Тогда по оси абсцисс откладывается не световой поток, а освещенность E в люксах.

3. Чувствительность - это отношение входной величины к выходной. Для фоторезисторов чаще всего используют токовую чувствительность S_I под которой понимают отношение фототока (или его приращения) к величине, характеризующей излучение (или его приращение). При отношении приращений чувствительность называют дифференциальной.

В зависимости от того, какой величиной характеризуется излучение, различают токовую чувствительность к световому

потоку Φ : $S_{\Phi} = I_{\Phi} / \Phi$; токовую чувствительность к освещенности E : $S_E = I_{\Phi} / E$.

При этом в зависимости от спектрального состава излученного света чувствительности могут быть либо интегральными $S_{\text{инт}}$ (при некогерентном излучении), либо монохроматическими S_{λ} (при монохроматическом излучении).

4. Абсолютная $S_{\text{абс}}(\lambda)$ и относительная $S(\lambda)$ спектральные характеристики - это значения чувствительности в полосе частот. Абсолютная спектральная характеристика представляет собой зависимость монохроматической чувствительности, выраженной в абсолютных единицах, от длины волны регистрируемого потока излучения.

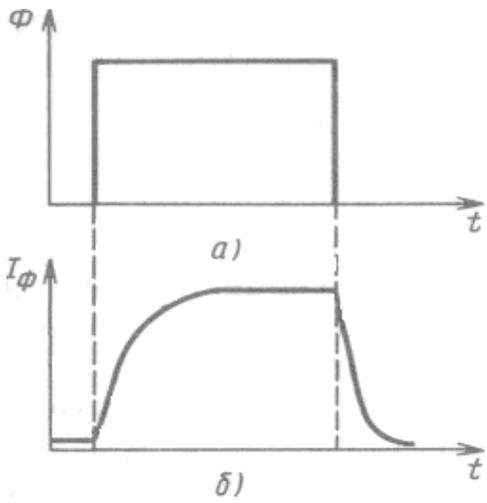


Рис. 2. Входной сигнал (а), переходная (б) характеристика фоторезистора

Относительная спектральная характеристика есть зависимость монохроматической чувствительности от длины волны, отнесенная к значению максимальной чувствительности:

$$S(\lambda) = S_{abc}(\lambda) / S_{abc \max}(\lambda). \quad (9)$$

Спектральная характеристика определяется материалом фоторезистора и введенными в него примесями. На рис. 1. *e* показаны спектральные характеристики фоторезисторов, выполненных на основе материалов: 1 - CdS, 2 - CdSe, 3 - CdTe. Вид спектральной характеристики свидетельствует о том, что для фоторезисторов некоторых типов необходимо тщательно подбирать пару излучатель - фотоприемник.

5. Граничная частота $f_{гр}$ —это частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью при немодулированном потоке ($f_{гр} \cdot 10^3 \div 10^5$ Гц).

В ряде случаев частотные свойства фоторезистора характеризуются переходной характеристикой. На рис. 2, *б* показаны переходные характеристики фоторезисторов с высокой (кривая 1) и низкой (кривая 2) темновой проводимостями. Хотя истинная переходная характеристика обычно не является строго экспоненциальной, в большинстве случаев инерционность характеризуют постоянной времени τ .

6. Температурный коэффициент фототока - это коэффициент, показывающий изменение параметров фоторезистора с изменением температуры:

$$\alpha_T = \frac{\partial I_\Phi}{\partial T} \cdot \frac{1}{I_\Phi} \Big|_{\Phi=const} \quad (10)$$

У промышленных фоторезисторов $\alpha_T \approx -10^{-3} \div 10^{-4}$ град⁻¹. Иногда используют температурную характеристику фоторезистора, показывающую относительное изменение

сопротивления при изменении температуры окружающей среды (см. рис. 2.6, в).

7. Коэффициент усиления фототока

$$K_R = \frac{\bar{\mu}_n \bar{\tau}_n U_R}{l^2} = \frac{\bar{\tau}_n}{t_{ПП}}, \quad (11)$$

где $t_{ПП} = l^2 / \bar{\mu}_n U_R = l / v_{дрейф}$ - время пролета носителей.

Коэффициент усиления, зависящий от отношения времени жизни и времени пролета, является исключительно важным параметром фоторезисторов. Поскольку для фоторезисторов характерны большие расстояния между контактами и слабые электрические поля, то их время пролета обычно больше аналогичного параметра для фотодиодов.

Несмотря на свою простоту, малые размеры и массу фоторезисторы нашли ограниченное применение, что связано с такими их недостатками, как низкое быстродействие, значительная температурная зависимость параметров, малая линейность световой характеристики.

Существуют два основных метода определения быстродействия приемника излучения. Первый метод заключается в облучении полупроводника прямоугольным импульсом и последующем наблюдении кинетики нарастания и спада сигнала. Если нарастание и спад сигнала описываются экспоненциальной функцией, то можно определить постоянную времени τ . В общем случае, когда кинетика фотоответа не описывается простой экспонентой, быстродействие фоторезистора принято определять по времени нарастания и спада фототока. Длительность импульса излучения источника возбуждения должна не менее чем в три раза превышать постоянную времени исследуемого фоторезистора, а длительность фронта и спада не должна превышать 0,1

постоянной времени. Уровень излучения выбирают в соответствии с документацией на конкретный тип прибора. Сопротивление нагрузки (Ом) выбирают из условия $R_H \leq 0,05 \tau_{\Phi} / C$, где τ_{Φ} - длительность фронта импульса излучения по уровню 0,63, C - емкость входа усилителя (Ф).

Длительность фронта спада выходного сигнала определяют на экране осциллографа на уровнях 0,63, как это показано на рис. 3, если другие не заданы в документации на конкретный тип прибора.

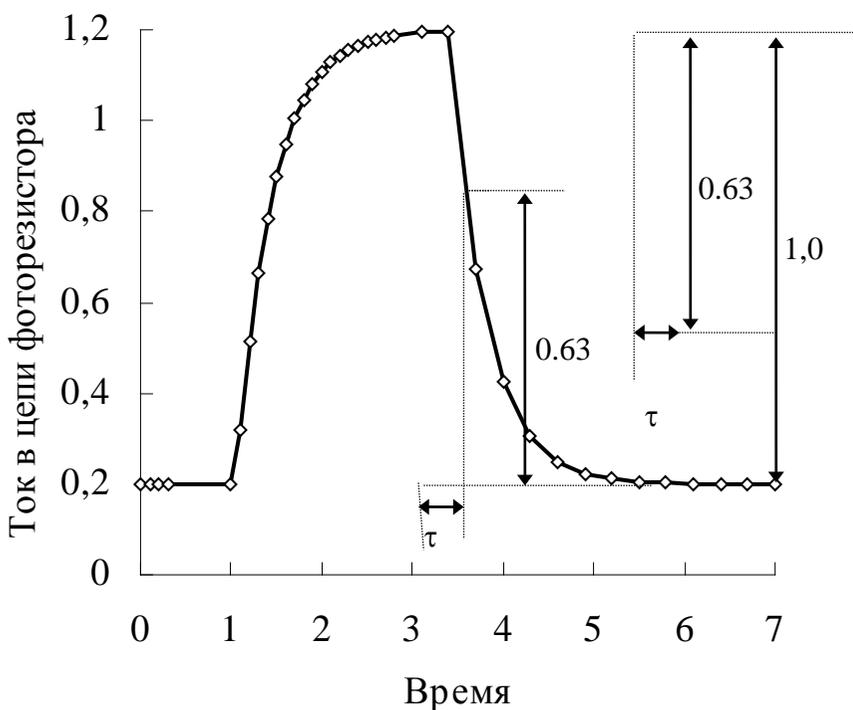


Рис.3. Определение временных параметров фоторезистора

Второй метод заключается в изменении частоты модуляции излучения, падающего на приемник, и измерении величины сигнала в зависимости от частоты. Если фоторезистор освещать излучением с прямоугольной модуляцией, то амплитуда переменной составляющей тока в цепи зависит от частоты модуляции f следующим образом:

$$i_p(f) = i_p(0) \operatorname{th} \frac{1}{4\tau f}, \quad (11)$$

где $i_p(0)$ - величина фототока в цепи без модуляции. Частотная зависимость для прямоугольной модуляции света изображена на рис. 4.

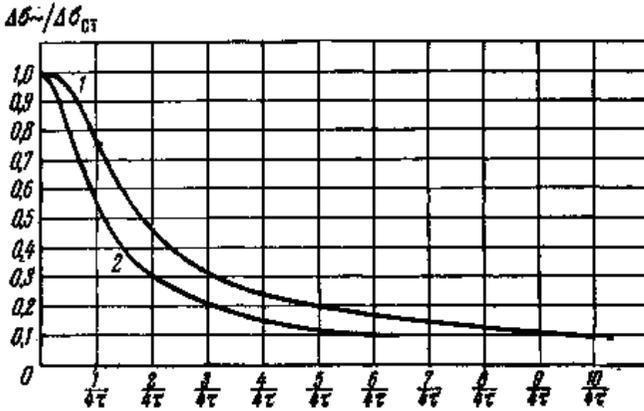


Рис. 4. Частотная зависимость фотопроводимости при различной модуляции интенсивности возбуждения

Для расчета τ из экспериментальной кривой $\Delta\sigma = f(f)$ можно, например, провести прямую, параллельную оси частот на высоте, равной 0,76 от максимальной ($\operatorname{th} 1 = 0,76$), и, опустив

перпендикуляр из точки пересечения на ось частоты, отсечь отрезок, равный $1/4\tau$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Функциональная схема измерительной установки представлена на рис. 6. Периодическое напряжение заданной формы и амплитуды, вырабатываемое генератором Г6-26, подается на светоизлучательный диод, преобразующий электрический сигнал в последовательность световых импульсов. Модулированный световой поток попадает на фоторезистор, расположенный в непосредственной близости от светодиода в общем закрытом корпусе (4).

Для проведения измерений фоторезистор подключают к регулируемому источнику постоянного напряжения (5). Последовательно с фоторезистором в цепь включен так называемый токовый резистор R_T (6). Сопротивление этого резистора должно удовлетворять следующим требованиям:

- 1) $R_T \ll R_{ФР}$ (ток в цепи преимущественно определяется сопротивлением фоторезистора $R_{ФР}$).
- 2) $R_T > U_{\min}/I$, где U_{\min} - минимальное напряжение, измеряемое осциллографом; $I = E_{П}/R_{ФР}$ - ток, протекающий через фоторезистор.

Напряжение на резисторе R_T поступает на «Y» вход осциллографа, на экране которого можно наблюдать сигнал, напряжение которого связано с током в измерительной цепи соотношением $U_{(t)} = I_{(t)} R_T$.

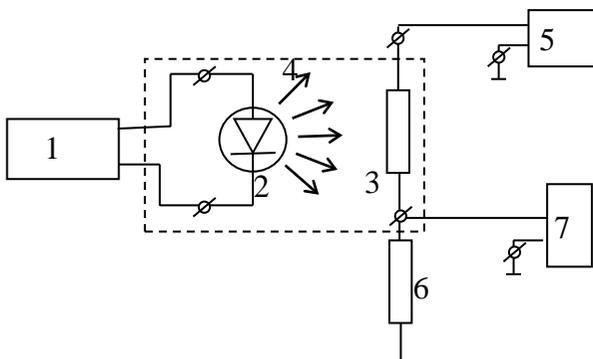


Рис. 6 Функциональная схема установки для измерения постоянной времени фоторезистора: 1-генератор Г6-26; 2-светодиод; 3-исследуемый фоторезистор; 4-светонепроницаемый корпус; 5-регулируемый источник постоянного напряжения; 6-токовый резистор R_T ; 7-осциллограф С1-67.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

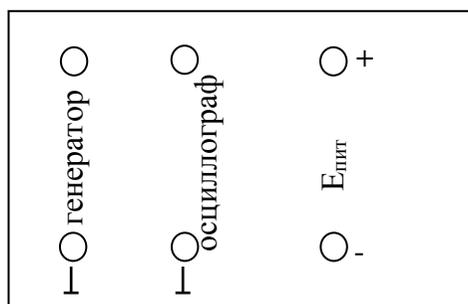


Рис. 7 Лабораторный макет для измерения постоянной времени фоторезистора

1. К лабораторному макету, изображенному на рис.7 подключить генератор, осциллограф и источник питания соблюдая полярность.
2. Снять зависимость величины сигнала фотопроводимости (А) от частоты сигналов, посылаемых с генератора. Данные занести в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1

| | |
|-------|--|
| f, Гц | |
| A, B | |

Частоту менять от 1 до 20 Гц через 2 Гц

от 20 до 100 Гц через 30 Гц

от 100 до 1000 Гц через 300 Гц.

3. Убедиться, что при низких частотах форма сигнала фотопроводимости мало отличается от формы импульсов напряжения, питающих СИД. Зарисовать наблюдаемую картину, записать частоту и измеренные значения амплитуды фототока.

4. По данным из табл.1 построить график $A_i(\lg(f_i))$. Из полученного графика определить A_0 , где A_0 – амплитуда сигнала фоторезистора при стационарной фотопроводимости (т.е. $t_0 \gg \tau$, где t_0 – длительность импульса).

5. Рассчитать относительную амплитуду и построить график зависимости $A_i/A_0(\lg(f_i))$. Используя выражение

$$A_i = A_0 \operatorname{th}(1/4\tau f)$$

при условии, что $\operatorname{th}(1/4\tau f) = 0.76$ при $1/4\tau f = 1$, определить постоянную времени жизни фоторезистора τ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип работы фоторезистора.
2. Собственная и примесная фотопроводимость. Чем определяется и от чего зависит длинноволновая граница в собственном и примесном полупроводниках?
3. Параметры и характеристики, фоторезистора.
4. Объяснить методы определения постоянной времени фоторезистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. С. 56- 68.
2. Дулин В.Н. Электронные приборы. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 262-734.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 2. М.: Мир, 1984. С. 339-345.