

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

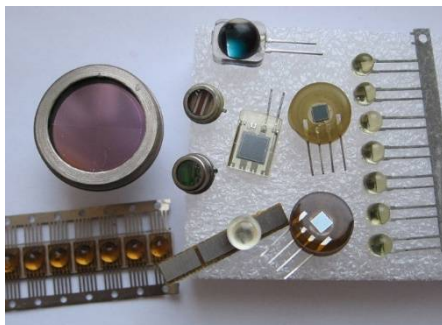
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Функциональная электроника»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения



Воронеж 2020

УДК 621.383 (07)
ББК 32.86я73

Составитель
канд. техн. наук Т. В. Свистова

Функциональная оптоэлектроника: методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Функциональная электроника» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т. В. Свистова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. 39 с.

В описаниях к лабораторным работам изложены физические явления, использующиеся в приборах функциональной оптоэлектронники – светодиодах, фотодиодах, фототранзисторах, фоторезисторах, фототиристорах. Приведены основные характеристики этих приборов и методы их измерения. Приведены вопросы для самопроверки и библиографический список.

Предназначены для студентов бакалавриата четвертого курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Му_лаб_раб_ФЭ.pdf.

Табл. 1. Ил. 12. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.383 (07)
ББК 32.86я73

Рецензент - Е. Ю. Плотникова, канд. техн. наук, доц. кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОДИОДОВ

Цель работы: а) получить экспериментальное подтверждение теоретических спектральных зависимостей; б) ознакомиться с основами метода измерения спектров излучательной рекомбинации в полупроводниках; в) ознакомиться с основными характеристиками промышленных полупроводниковых светоизлучающих диодов.

Используемое оборудование и материалы: отградуированный монохроматор УМ-2, генератор синусоидальных колебаний ГЗ-34, резонансный усилитель типа В6-4, фотоприемное устройство, светоизлучающие диоды (СИД), соединительные провода и кабели.

Общие сведения о светоизлучающих диодах

СИД представляют собой оптоэлектронные приборы, в которых осуществляется преобразование электрической энергии в оптическую. В основе этого процесса лежит излучение света, обусловленное электронным переходом из зоны проводимости полупроводника в валентную зону. Для возбуждения излучения используется инжекция носителей. С ее помощью обеспечивается создание неравновесных носителей заряда, что обеспечивает генерацию оптического излучения в p -переходе полупроводника. Получение оптической мощности на выходе оптоэлектронных устройств оказывается очень простым: для этого достаточно подать напряжение на вход прибора и обеспечить протекание по нему тока. Путем изменения тока инжекции можно менять оптическую мощность на выходе прибора, т.е. осуществлять оптическую модуляцию.

СИД в большинстве случаев применяют как элементы индикации в виде точек и цифр. Для индикации используется видимый свет. В настоящее время разработаны СИД с излучением от зеленого до красного цвета. Цвет излучения определяется применяемым материалом: $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{P}_{1-y}\text{As}_y$ (красный), $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (красный, оранжевый), GaP (красный, желтый, а также зеленый), GaN (зеленый, голубой, фиолетовый). В полупроводниках с непрямыми переходами типа GaP вероятность рекомбинационного излучения, вызванного межзонным переходом, мала, и для повышения эффективности источника излучения часто применяется введение примесей азота, цинка, кислорода, становящихся центрами излучения люминесценции.

СИД инфракрасного диапазона находят применение в качестве источников света в системах связи на небольшие расстояния с шириной полосы до нескольких десятков мегагерц.

Спектральные характеристики излучения

В отличие от лазеров СИД являются источниками спонтанного излучения. Интенсивность спонтанного излучения зависит от плотности заполненных состояний в зоне проводимости и плотности свободных состояний в валентной зоне:

$$I(h\nu) \sim \nu \cdot \langle M \rangle^2 N_c f_c(E) N_v f_v(E), \quad (1.1)$$

где $\langle M \rangle$ – матричный элемент перехода, ν – частота испускаемых фотонов, N_c и N_v – плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно, $f_c(E)$ и $f_v(E)$ – функции распределения Ферми-Дирака для электронов и дырок, соответственно.

Величина $\langle M \rangle$ характеризует вероятность излучательной рекомбинации и зависит в первую очередь от зонной структу-

ры полупроводникового материала. В полупроводниках с прямыми оптическими переходами легко достигается излучательная рекомбинация, а короткое время существования спонтанного излучения позволяет с высокой скоростью менять интенсивность света. В полупроводниках с непрямыми переходами вероятность излучательной рекомбинации мала, что приводит к существованию больших времен спонтанного излучения: от нескольких десятков до сотен микросекунд.

Функции распределения $f_c(E)$ и $f_v(E)$ в области генерации зависят от уровня легирования диодной структуры и плотности тока инжекции неосновных носителей заряда через p - n -переход.

Спектр спонтанного излучения прямозонного полупроводника имеет вид

$$I(\nu) \sim \nu^2 (h\nu - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{h\nu - E_g}{kT}\right), \quad (1.2)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны, $h\nu$ – энергия квантов света, k – постоянная Больцмана, T – температура перехода.

Поскольку ширина запрещенной зоны полупроводника зависит от температуры, то, согласно (1.2), имеет место смещения максимума полосы излучения. С ростом температуры максимум смещается в длинноволновую область спектра. Ширина спектральной полосы излучения на полувысоте описывается выражением вида

$$\Delta\lambda_{1/2} = \frac{3kT}{hc} \lambda_{\max}^2, \quad (1.3)$$

где λ_{\max} – длина волны излучения в максимуме.

При заданном уровне инжекции наряду с излучательной рекомбинацией протекают конкурирующие безызлучательные процессы. Квантовая эффективность люминесценции определяется как отношение числа инжектированных носителей,

дающих вклад в излучение, к полному числу рекомбинирующих носителей и может быть выражена через времена жизни следующим образом:

$$\eta_q = \frac{R_r}{R} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_r}, \quad (1.4)$$

где τ_r и τ_{nr} – времена жизни излучательной и безызлучательной рекомбинации, соответственно, а R_r и R – скорости излучательной и полной рекомбинации. Для полупроводниковых слоев p -типа проводимости скорость рекомбинации и время жизни связаны соотношением $R = (n - n_0)/\tau$, аналогично для слоев n -типа $R = (p - p_0)/\tau$, где n_0 и p_0 – концентрации электронов и дырок в состоянии теплового равновесия, а n и p – электронная и дырочная концентрации при оптическом возбуждении. Время жизни неосновных носителей τ

$$\tau = \frac{\tau_{nr}\tau_r}{\tau_{nr} + \tau_r}. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.4) видно, что для обеспечения высокой квантовой эффективности время жизни τ_r должно быть мало.

Модуляционные характеристики СИД

Время жизни инжектированных носителей ограничивает полосу модуляции интенсивности излучения СИД при модуляции тока инжекции. На высоких частотах модуляции выводимая оптическая мощность содержит как меняющуюся во времени, так и постоянную части. Промодулированная мощность оптического излучения описывается следующим выражением:

$$P_m(f) = \frac{P_m(0)}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (1.6)$$

где $P_m(0)$ – мощность, излучаемая на постоянном токе ($f \rightarrow 0$); f – частота модуляции.

Полоса модуляции обычно определяется по частоте f_c , на которой амплитуда модулированного излучения падает в $\sqrt{2}/2$ раз. В этом случае

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right). \quad (1.7)$$

При модулировании с частотой, превышающей f_c , концентрация носителей в активном слое меняется только в зависимости от времени жизни носителей τ , поэтому модуляционная эффективность будет падать.

Методика измерения спектра излучения СИД

Схема измерительной установки представлена на рисунке.

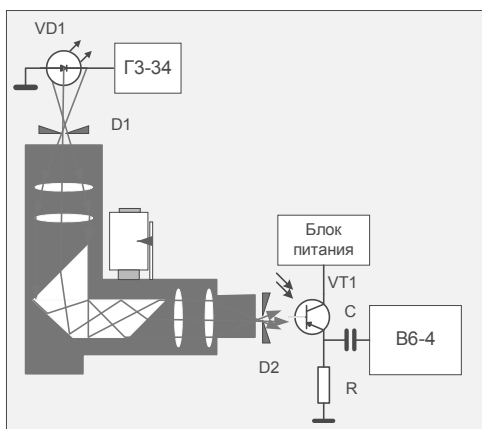


Рис. 1.1. Схема установки для измерения спектров излучения светодиодов

Она включает следующие элементы: генератор синусоидальных колебаний ГЗ-34 обеспечивает питание исследуемых СИД (VD_1), располагающихся перед входной щелью D_1 монохроматора излучений УМ-2. На корпусе механизма выходной щели монохроматора D_2 смонтирован фототранзистор VT_1 , соединенный последовательно с нагрузочным сопротивлением R и источником постоянного напряжения БП. Переменный электрический сигнал с резистора R через разделительную емкость C подается на вход селективного микровольтметра В6-4. Принцип действия установки состоит в следующем. Модулированное излучение от СИД VD_1 проходит через монохроматор, где разлагается в спектр с выделением требуемой длины волны на выходной щели D_2 . Монохроматическое излучение попадает на приемную площадку фототранзистора VT_1 , в цепи транзистора возникает фототок, что приводит к увеличению падения напряжения на резисторе R и регистрируется селективным микровольтметром. Использование модулированного излучения и селективное детектирование сигнала фототока позволяет выделить сигнал от СИД на фоне постоянных потоков паразитных излучений и сетевых наводок. Получение спектра излучения сводится к измерению показаний селективного микровольтметра, настроенного на частоту генератора, питающего СИД, в зависимости от длины волны, выделяемой монохроматором УМ-2. Длина волны задается установкой механизма развертки спектра в положения, определяемые градуировочными зависимостями. Ширина входной и выходной щелей должна быть минимальной при достаточной точности регистрации выходных сигналов. Это требование позволяет уменьшить влияние аппаратного уширения на результаты измерений и, кроме того, не вводит фототранзистор в режим ограничения.

Монохроматор УМ-2, общий вид которого показан на рис. 1.2, является точным спектральным прибором и предназначен для разложения в спектр излучения источника света в

диапазоне от 380 до 1000 нм. Получение монохроматического излучения в данном приборе основано на явлении дисперсии света – зависимости фазовой скорости света v от длины волны λ : $v = f(\lambda)$ или $\lambda = f(n)$, где n – абсолютный показатель преломления среды.

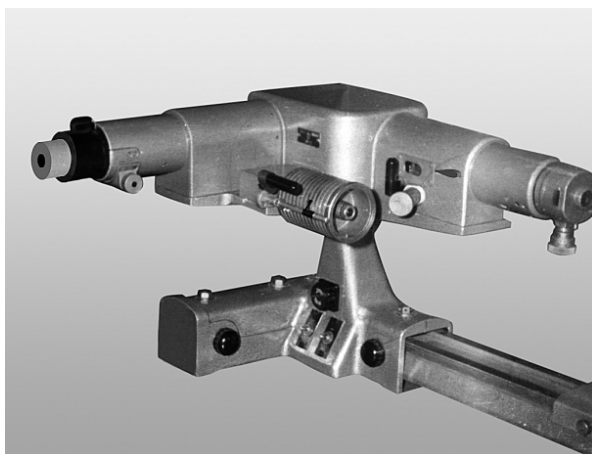


Рис. 1.2. Монохроматор УМ-2

Принципиальная схема монохроматора представлена на рис. 1.3.

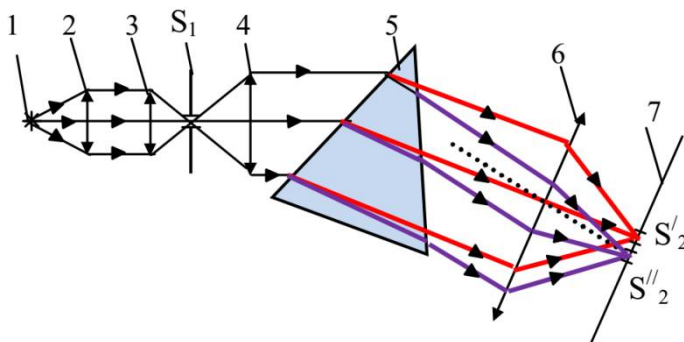


Рис. 1.3. Принципиальная схема монохроматора

Свет от источника 1 фокусируется линзами 2 и 3 на входную щель монохроматора S_1 , находящуюся в фокальной плоскости его объектива 4, и параллельным пучком падает на диспергирующий элемент монохроматора – призму 5. Призма разлагает свет на монохроматические составляющие. Выходной объектив 6 монохроматора собирает монохроматические пучки в различных точках фокальной плоскости 7, где расположена выходная щель S_2 .

Спектральные линии различных цветов в фокальной плоскости 7 представляют собой монохроматические изображения входной щели S_1 . Совокупность этих изображений представляет спектр излучения источника. Перемещая спектр относительно щели S_2 поворотом призмы 5, можно получить в плоскости выходной щели световые пучки различно.

Оптико-механическая схема монохроматора УМ-2 приведена на рис. 1.4. В состав прибора входят следующие основные части.

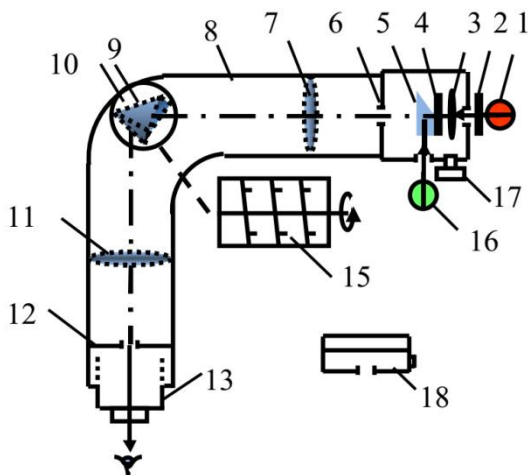


Рис. 1.4. Оптико-механическая схема монохроматора

Входная щель 6 переменной ширины от 0 до 4 мм освещается источником света 1 через защитное стекло 2, конденсор 3 и защитное стекло щели 4. Она снабжена микрометрическим винтом 17, который позволяет открыть щель на нужную ширину. Обычная рабочая ширина щели равна 0,02 – 0,03 мм. Для наблюдения самых слабых линий в крайней фиолетовой области спектра ее приходится несколько расширять до 0,05 - 0,06 мм.

Призма сравнения 5 перед щелью служит для сравнения спектров контролируемого источника 16, установленного сбоку монохроматора, и эталонного 1, установленного на оптической скамье перед входной щелью 6. Призма сравнения опускается (поднимается) при помощи вертикального штифта. Ее действие основано на явлении полного внутреннего отражения света, падающего под углом 45° к отражающей грани призмы. Если призма сравнения находится в верхнем положении, излучение контролируемого источника проходит сквозь всю вертикальную щель 6, и через окуляр 13 наблюдают спектр эталонного источника. Когда призма сравнения находится в нижнем положении, она перекрывает половину щели, на которую попадает свет, и, в результате, через окуляр 13 можно наблюдать раздельно и одновременно два линейчатых спектра – контролируемого и эталонного источников.

Щель 6 установлена в фокусе объектива коллиматора 7, который имеет микрометрический винт (на схеме не показан), позволяющий смещать объектив относительно щели при фокусировке спектральных линий различных цветов.

Параллельный пучок лучей, идущий из объектива, падает на сложную диспергирующую призму 9 (рис. 1.4), установленную на поворотном столике 10. Призма 9 состоит из трех склеенных призм. Две призмы с преломляющими углами 30° изготовлены из тяжелого флинта, обладающего большой дисперсией. Промежуточная призма сделана из крона. Лучи отражаются от ее гипотенузной грани и поворачиваются на 90° . Бла-

годаря такому устройству дисперсия первых двух призм складывается.

Поворотный столик 10 вращается вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта с измерительным барабаном 15. При вращении барабана призма поворачивается, и в центре поля зрения окуляра перемещается свет различной длины волны (цветной спектр), проходящий призму в минимуме отклонения. Каждой длине волны света на шкале измерительного барабана будет соответствовать свой отсчет. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. Вдоль дорожки скользит указатель поворота барабана. Шкала барабана нанесена в градусных делениях от 0 до 3500 ° с ценой деления 2 ° и оцифровкой через 50 °.

После прохождения диспергирующей призмы спектральный пучок лучей попадает на объектив 11 зрительной трубы, в фокусе которого помещен сменный окуляр 13 с указателем или окуляр без указателя. Оба окуляра могут быть заменены выходной щелью 18, и тогда зрительная труба становится выходным коллиматором.

Массивный корпус 8 предохраняет прибор от повреждений и загрязнений.

Для эксплуатации монохроматора требуется предварительно произвести его градуировку и составить паспорт в виде таблицы или градуировочной кривой $\lambda = f(b)$, где λ - длина световой волны, b – соответствующее ей градусное деление измерительного барабана.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием приборов ГЗ-34, В6-4.
2. Ознакомиться с предельными характеристиками исследуемых СИД и выбрать режим работы генератора ГЗ-34, установив уровень выходного сигнала в соответствии с номинальным рабочим напряжением СИД.

3. Выбрать частоту генератора и определить соответствующий диапазон измеряемого сигнала на микровольтметре В6-4, используя режим работы “широкая полоса”.

4. Открыть щели D_1 и D_2 монохроматора и подать питание на СИД VD₁. Вращением механизма развертки спектра добиться устойчивого сигнала на микровольтметре.

5. Перейти в режим работы вольтметра “узкая полоса” и вращением ручек ГРУБО и ПЛАВНО установить частоту детектирования, соответствующую максимальному сигналу.

6. Вращением механизма развертки спектра добиться максимального уровня выходного сигнала, после чего плавно уменьшить ширину как входной, так и выходной щелей, наблюдая за уменьшением показаний стрелочного индикатора селективного микровольтметра и изменяя положения переключателя ПРЕДЕЛЫ в сторону меньших значений. Эту процедуру повторять до тех пор, пока не станут заметны неустойчивости в показаниях прибора.

7. Вращением механизма развертки спектра изменить длину волны на выходе монохроматора и убедиться, что выбранные пределы измерения обеспечивают уверенную регистрацию излучения при хорошем отношении сигнал/шум.

8. Вращением барабана механизма развертки спектра привести флажок указателя делений барабана в крайнее положение, после чего, плавно вращая барабан в обратном направлении, фиксировать в таблице измерений длину волны и величину сигнала на стрелочном индикаторе микровольтметра. Не рекомендуется изменять направление вращения, так как из-за возможных люфтов в механизме развертки возникнут несоответствия отсчетов с градуировочной кривой.

Получение спектра излучения сводится к измерению показаний селективного микровольтметра, настроенного на частоту генератора, питающего СИД, в зависимости от длины волны, выделяемой монохроматором УМ-2. Длина волны задается установкой механизма развертки спектра в положения,

определяемые градуировочными зависимостями.

Т.е. снимаем зависимость показаний селективного вольтметра (столбец 4, табл. 1.1), от делений барабана монохроматора (столбец 1, табл. 1.1).

Столбец 2 заполнить, используя градуировку монохроматора (рис. 1.5) или формуле Гартмана

$$\lambda = \lambda_0 - \frac{a}{b-b_0}, \quad (1.8)$$

где b – деление барабана монохроматора, λ_0 , a и b_0 – постоянные, определяемые экспериментально: $\lambda_0 = 231$ нм; $a = 639047$; $b_0 = 4320$. Длина волны, вычисленная по этой формуле, имеет размерность нм.

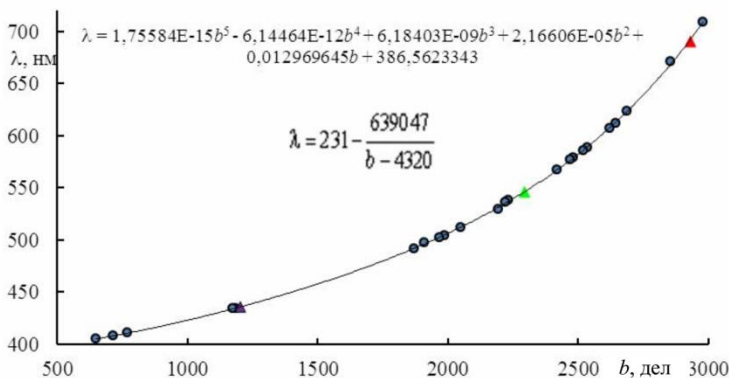


Рис. 1.5. Градуировочная зависимость $\lambda = f(b)$.

Столбец 3 табл. 1.1 заполнить, используя формулу $E = 1,24 / \lambda$, где λ , мкм.

9. Полученные данные используются для построения спектра излучения СИД в координатах $U = f(\lambda)$ и $U = f(h\nu)$, с целью определения ширины запрещенной зоны согласно

выражению для СИД или энергии оптических переходов в случае индикаторных СИД.

10. На основании результатов измерения спектров излучения СИД определяются значения полуширины спектров и проводятся сопоставления с ожидаемыми значениями. Все результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица

Деления барабана монохроматора, b	Длина волны λ , нм	Энергия $E = h\nu$, эВ	U, мкВ
1	2	3	4

Контрольные вопросы

1. Перечислите известные Вам прямозонные полупроводниковые материалы и определите спектральные диапазоны излучения СИД на их основе.

2. Какими факторами определяется внешняя квантовая эффективность СИД?

3. Опишите типовые конструкции индикаторных СИД и СИД для систем волоконной оптической связи ВОЛС.

4. Чем определяется диаграмма направленности излучения СИД?

5. Проанализируйте факторы, определяющие быстродействие СИД.

6. Сопоставьте характеристики СИД и полупроводникового лазера, оцените их преимущества и недостатки.

7. Почему спектр излучения лазерного СИД претерпевает качественное изменение при переходе из диодного режима работы в режим оптической квантовой генерации?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: а) ознакомиться с основными характеристиками фоторезисторов, б) получить навыки практического измерения постоянной времени фоторезисторов методом измерения частотных зависимостей фотоответа.

Используемое оборудование и материалы: генератор синусоидальных колебаний ГЗ-33, двухлучевой осциллограф С1-18, светоизлучающие диоды, исследуемые фоторезисторы, блок питания, формирователь прямоугольных импульсов, соединительные кабели.

Общие сведения о фоторезисторах

Фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, монокристаллическую или в виде тонкой пленки, на противоположных концах которой созданы омические контакты. При падении излучения на поверхность фоторезистора в последнем генерируются носители вследствие возбуждения либо межзонных переходов (собственное возбуждение), либо переходов с участием энергетических уровней в запрещенной зоне (примесное возбуждение), что приводит к увеличению проводимости. Проводимость собственных фоторезисторов описывается формулой $\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p)$, и увеличение проводимости под действием освещения в основном связано с увеличением числа носителей. Длинноволновая граница фотопроводимости в этом случае определяется из соотношения

$$\lambda_{кр} (\text{мкм}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g (\text{эВ})}, \quad (2.1)$$

где $\lambda_{кр}$ – длина волны, соответствующая ширине запрещенной зоны E_g .

Излучение с длинами волн, меньшими $\lambda_{кр}$, поглощается в полупроводнике с образованием электронно-дырочных пар.

Работа фотодетекторов вообще и фоторезисторов в частности характеризуется тремя параметрами: квантовой эффективностью или усилением, временем фотоответа и чувствительностью (обнаружительной способностью). Рассмотрим процессы, протекающие в фоторезисторе при воздействии излучения. Пусть в какой-то начальный момент времени $t = 0$ число носителей, возникших в единице объема за счет генерации потоком фотонов, равно Δn_0 . Если с момента $t = 0$ освещение было выключено, то число носителей в том же объеме уменьшается за счет рекомбинации по закону $\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp(-t/\tau)$, где τ – время жизни носителей. Другими словами, скорость рекомбинации равна $1/\tau$. Если поток фотонов постоянен и распределен равномерно по поверхности фоторезистора с площадью $A = W \cdot L$, то общее число фотонов, падающих на поверхность в единицу времени, равно $P_{opt}/h\nu$, где P_{opt} – мощность падающего излучения и $h\nu$ – энергия фотона.

В стационарном состоянии скорость генерации носителей должна быть равна скорости рекомбинации. Если толщина прибора D значительно больше, чем глубина проникновения света $1/\alpha$, то общая стационарная скорость генерации носителей в единице объема равна

$$G = \frac{n}{\tau} = \frac{\eta \frac{P_{opt}}{h\nu}}{WLD}, \quad (2.2)$$

где η – квантовая эффективность, т.е. число фотогенерированных носителей, отнесенное к числу падающих фотонов, и n – число носителей в единице объема. Фототок, протекающий между контактами, равен

$$I_p = (\sigma E)WD = (e\mu_n nE)WD = (enV_d)WD, \quad (2.3)$$

где E – напряженность электрического поля внутри фоторезистора и V_d – дрейфовая скорость. Подставляя n из уравнения (2.2) в уравнение (2.3), получаем

$$I_p = e \left(\eta \frac{P_{opt}}{h\nu} \right) \left(\frac{\mu_n \tau E}{L} \right). \quad (2.4)$$

Определив исходный фототок как $I_{ph} = e(\eta P_{opt}/h\nu)$, из уравнения (2.4) получим коэффициент усиления фототока

$$\frac{I_p}{I_{ph}} = \frac{\mu_n \tau E}{L} = \frac{\tau}{t_r}, \quad (2.5)$$

где $t_r = L/V_d$ – время пролета носителей.

Коэффициент усиления, зависящий от отношения времени жизни и времени пролета, является исключительно важным параметром фоторезисторов. Для образцов с большим временем жизни и малым расстоянием между контактами коэффициент усиления может быть существенно больше единицы. Время фотоответа фоторезистора определяется временем пролета t_r . Поскольку для фоторезисторов характерны большие расстояния между контактами и слабые электрические поля, то их время фотоответа обычно больше аналогичного параметра для фотодиодов.

Рассмотрим теперь оптический сигнал с интенсивностью, модулированной по закону

$$P(\omega) = P_{opt} (1 + m e^{j\omega t}), \quad (2.6)$$

где P_{opt} – средняя мощность оптического сигнала, m – коэффициент модуляции и ω – частота модуляции. Средний ток I_p , обусловленный оптическим сигналом, определяется выражением (2.4). Среднеквадратичная мощность модулированного оптического сигнала равна $mP_{opt}/\sqrt{2}$, а среднеквадратичный токовый сигнал может быть представлен в виде

$$i_p \approx \frac{e\eta m P_{opt}}{\sqrt{2} h \nu} \left(\frac{\tau}{t_r} \right) \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}. \quad (2.7)$$

Методы измерения быстродействия фоторезисторов

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 фототока 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 от 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. 2.1, если другие не заданы в документации на конкретный тип прибора.

Второй метод заключается в изменении частоты модуляции излучения, падающего на приемник, и измерении величины сигнала в зависимости от частоты. В случае синусоидального закона модуляции (2.6), согласно (2.7), уменьшение фототока в цепи фоторезистора в $\sqrt{2}$ раз наступает при выполнении условия $\omega\tau = 1$. Принято строить частотную характеристику чувствительности фоторезистора не менее чем по десяти значениям частоты модуляции и определять граничную частоту на уровне 0,707 от максимального участка характеристики.

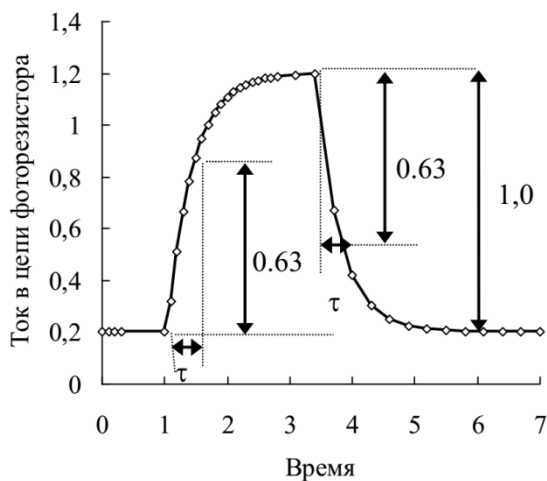


Рис. 2.1. Определение временных параметров фоторезистора

Если фоторезистор освещать излучением с прямоугольной модуляцией, то амплитуда переменной составляющей тока в цепи зависит от частоты модуляции f следующим образом:

$$i_p(f) = i_p(0)th \frac{1}{4\tau f}, \quad (2.8)$$

где $i_p(0)$ – величина фототока в цепи без модуляции. Время τ можно определить, пользуясь сравнением экспериментальной частотной зависимости $i_p(f)/i_p(0)$ с расчетным графиком.

Схема установки для измерения постоянной времени фоторезистора показана на рис. 2.2.

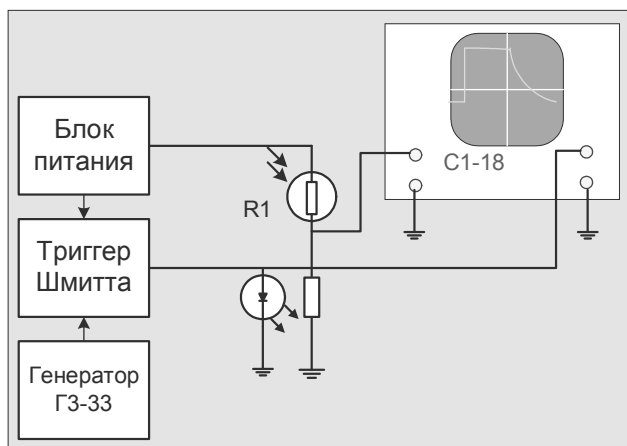


Рис. 2.2. Схема установки для измерения постоянной времени фоторезистора

Постоянная времени определяется по частотной зависимости амплитуды переменного сигнала в цепи фоторезистора при его возбуждении импульсами прямоугольной формы. Частота импульсов света задается генератором синусоидальных сигналов типа ГЗ-33, который управляет формирователем прямоугольного напряжения на основе триггера Шмитта. Последовательность прямоугольных импульсов с выхода формирователя поступает как на малоинерционный СИД, так и на один из входов двухлучевого осциллографа. Высокая граничная частота используемых СИД типа АЛ 107А обеспечивает прямоугольную модуляцию излучения, падающего на фоторезистор. Триггер Шмитта и

подключены к автономному стабилизированному источнику постоянного напряжения. Изменение сопротивления приемника излучения регистрируется с помощью второго входа измерительного осциллографа, подключенного к сопротивлению нагрузки. Конструктивно источник питания и формирователь прямоугольных импульсов оформлены в виде одного блока с необходимыми радиочастотными разъемами, а СИД и исследуемые фоторезисторы смонтированы на сменных клеммных колодках.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием приборов ГЗ-33, С1-18.
2. Произвести подключение приборов и исследуемых фоторезисторов в соответствии со схемой рис. 2.2.
3. Включить питание осциллографа и генератора, установив предел уровня выходных сигналов 3 В, а после их прогрева и выхода в рабочий режим включить питание блока формирования прямоугольных импульсов.
4. Настроить осциллограф для регистрации меандра напряжений по входу “Б” и сигнала фотопроводимости по входу “А” осциллографа.
5. 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.
6. Повышая частоту следования импульсов, фиксируйте ее значения и измеряйте величину сигнала фотопроводимости. Результаты измерений занесите в таблицу.
7. Снимите вид осциллограмм на таких частотах, когда становятся заметными переходные процессы и когда амплитуда фотоответа не достигает стационарных значений.
8. На основании данных таблицы измерений постройте зависимость сигнала фотопроводимости от частоты следова-

ния импульсов. Воспользуйтесь выражением (2.8) для определения постоянной времени фоторезистора.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется вид спектральной зависимости обнаружительной способности фоторезистора?
2. Охарактеризуйте важнейшие параметры фоторезистора.
3. В чем состоят особенности фоторезисторов, используемых в далекой ИК-области спектра?
4. Перечислите и охарактеризуйте полупроводниковые материалы, применяемые для изготовления фоторезисторов, работающих в видимом диапазоне.
5. Перечислите и проанализируйте факторы, ограничивающие чувствительность фоторезисторов.
6. Проанализируйте роль геометрических факторов на параметры фоторезистора.
7. Опишите предельные параметры фоторезисторов.
8. Дайте характеристики шумов в фоторезисторах.
9. Приведите возможные варианты использования фоторезисторов в электронных устройствах.
10. Существуют сдвоенные фоторезисторы, размещенные в общем корпусе. Опишите возможные варианты их применения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНЫХ ОПТОПАР

Цель работы: а) ознакомиться с основными свойствами и характеристиками диодных оптронов; б) усвоить принципы проведения измерений входных, выходных и передаточных характеристик оптронов; в) получить практические навыки измерений характеристик.

Используемое оборудование и материалы: макет стенда для измерений входных и выходных характеристик оптопар.

Принцип действия, основные параметры и применение оптопар

В диодной оптопаре в качестве фотоприемного элемента используется фотодиод на основе кремния, а в качестве излучателя – инфракрасный светоизлучающий диод. Максимум спектральной характеристики излучения приходится на длину волны около 1 мкм. Излучение с такой длиной волны вызывает в кремнии генерацию пар носителей – электронов и дырок. Электроны и дырки разделяются электрическим полем перехода фотодиода и заряжают p -область положительно, а n -область отрицательно. Таким образом на выходе фотодиода появляется фотоэдс. Это так называемый фотогенераторный режим работы фотодиода.

Если к фотодиоду приложено обратное смещение, то электроны и дырки, генерированные излучением, увеличивают обратный ток фотодиода. Это фотодиодный режим работы приемного элемента. Диодные оптопары могут работать как в фотогенераторном, так и в фотодиодном режиме. Значение обратного фототока практически линейно возрастает с увеличением силы света излучающего диода.

Диоды излучателя и приемника изготавливаются по планарно-эпитаксиальной технологии. Структуры соединяются между собой оптически прозрачным клеем, слой которого обеспечивает надежную изоляцию входной цепи оптопары (излучателя) от выходной (фотодиода).

Для повышения быстродействия и обеспечения оптимальной квантовой эффективности преобразования обычно используют фотодиоды с $p-i-n$ -структурой. Возникающее в i -области сильное электрическое поле приводит к сокращению времени пролета носителей заряда через эту область и быстрому нарастанию и спаду фототока.

Фотодиод с $p-i-n$ -структурой состоит, как показано на рис. 3.1, из n^+ -подложки, слаболегированного i -слоя и тонкого p^+ -слоя толщиной до 0,3 мкм.

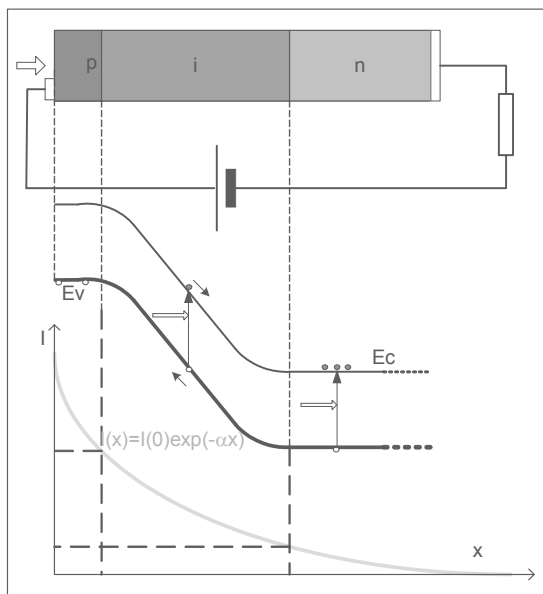


Рис. 3.1. Принцип действия $p-i-n$ -фотодиода

При приложении обратного смещения обедненный слой распространяется на весь i -слой собственной проводимости. В результате уменьшается емкость перехода, расширяется область поглощения света и повышается чувствительность фотодиода. Падающий свет, затухая по экспоненциальному закону, в зависимости от значения коэффициента поглощения α , вызывает генерацию. Фотовозбужденные носители, появившиеся в обедненном слое, ускоряются электрическим полем обедненного слоя ($E \geq 10^3$ В/см) до скорости насыщения дрейфа порядка 10^7 см/с. Эту область называют областью дрейфа. Так как фотовозбужденные носители за пределами обедненного слоя в p^+ - и n^+ -слоях движутся за счет диффузии, то их скорость движения, равная примерно 10^4 см/с, оказывается на три порядка ниже скорости дрейфа. Этот диффузионный ток является причиной ухудшения быстродействия фотодиода, которое проявляется в виде “хвоста” импульсной характеристики.

Чтобы одновременно удовлетворить требованиям быстродействия и высокого квантового выхода, необходимо, чтобы область поглощения света находилась в обедненном слое. Для этого p^+ -слой делают как можно тоньше, а толщину i -слоя выбирают большей длины поглощения свет (величина $1/\alpha$). Выражение для квантовой эффективности имеет вид

$$\eta \cong (1 - R)(1 - e^{-\alpha W}), \quad (3.1)$$

где R – коэффициент отражения, W – ширина i -слоя.

Квантовая эффективность фотодиода в оптроне определяется величиной коэффициента отражения, который может быть уменьшен за счет использования разделительных оптических сред с высокими показателями преломления, например, халькогенидных стекол.

Основными параметрами диодных оптопар являются следующие:

– входное напряжение $U_{вх}$ – постоянное входное напря-

жение на диоде-излучателе при заданном прямом токе;

– максимальное входное обратное напряжение $U_{0\text{вх max}}$, приложенное ко входу диодной оптопары, при котором прибор не выходит из строя;

– максимальное выходное обратное постоянное и импульсное напряжение $U_{\text{max вых обр}}$ и $U_{\text{max вых обр и}}$ определяют максимальные напряжения в выходной цепи оптрона, при которых обеспечивается его надежная работа. Выходной обратный ток (темновой) $I_{\text{вых обр}}$ – ток, протекающий в выходной цепи диодной оптопары при отсутствии входного тока и заданном напряжении на выходе;

– время нарастания выходного сигнала $t_{\text{нр}}$ – интервал времени, в течение которого выходной сигнал оптопары изменяется от 0,1 до 0,5 максимального значения;

– время спада выходного сигнала $t_{\text{сн}}$ – интервал времени, в течение которого выходной сигнал меняется от 0,9 до 0,5 максимального значения;

– статический коэффициент передачи тока K_I – отношение разницы выходного тока и выходного темнового тока к входному току, выраженное в процентах. Коэффициент передачи тока в диодных оптопарах составляет единицы процентов и примерно равен значению квантового выхода СИД. Так как темновой выходной ток обычно значительно меньше фототока, коэффициент передачи тока выражают как $K_I \approx I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$.

– для многоканальных диодных оптопар указывается $C_{\text{пр к}}$ – емкость между информационными каналами;

– максимальное напряжение изоляции между каналами $U_{\text{max к из}}$ – максимальное напряжение, которое может быть приложено между информационными каналами и которое не приводит к потере электрической прочности оптопары.

Для описания свойств диодных оптопар обычно используются входные и выходные вольт-амперные характеристики, передаточные характеристики в фотогенераторном и в фотодиодном режимах.

Выходная характеристика оптопары аналогична обратной ветви вольт-амперной характеристики диода. Обратный ток практически не зависит от напряжения. При большом напряжении возникает электрический пробой.

Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от тока входного. Она практически линейна в широком диапазоне значений входного тока.

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 – 0,8 В.

При использовании диодных оптронов в схемах радиоэлектроники учитывается ряд свойств, присущих этому классу оптронов:

- самое высокое быстродействие фотоприемников на *p-i-n*-диодах;
- малые темновые токи в выходной цепи;
- высокое сопротивление гальванической развязки.

Макет стенда для измерения характеристик оптронов

Принципиальная схема стенда для измерения характеристик диодных оптопар представлена на рис. 3.2. Она содержит две независимые цепи. Входная цепь обеспечивает питание и контроль режима работы излучающего диода: падение напряжения на СИД измеряется вольтметром V_1 , а ток инжекции – миллиамперметром. Изменение тока через диод обеспечивается регулируемым источником питания постоянного тока.

Выходная цепь предназначена для измерения фотоэдс или фототока фотодиода в зависимости от положения переключателя П1. В положении “ $U_{\text{вых}}$ ” при максимальном значении резистора R и при отсутствии напряжения на источнике

постоянного питания ИРН-2, высокоомный вольтметр V_2 регистрирует значения напряжений холостого хода.

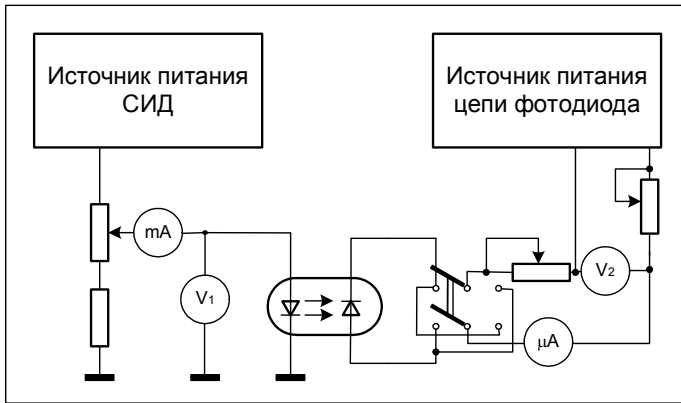


Рис. 3.2. Принципиальная схема измерителя характеристик диодных оптронов

В положении “ $U_{обр}$ ” на фотодиод подается обратное напряжение, а ток через него регистрируется микроамперметром. Ток короткого замыкания измеряется при выведенном резисторе R и нулевом напряжении на фотодиоде. Таким образом, представленная схема обеспечивает измерение параметров фотодиода при протекании через него только обратных токов. Включение измерителя характеристик оптронов осуществляется тумблерами СЕТЬ и ИЗМ. (измерение).

Порядок выполнения работы

1. Измерить входную характеристику оптрона, для чего, плавно вращая рукоятку “ $I_{вх}$ ”, изменять значения прямого напряжения и регистрировать величины тока инъекции. Результаты измерений заносить в таблицу.
2. Измерить зависимость фото-ЭДС на выходе оптрона от величины тока входа, для чего тумблер П1 установить в поло-

жение " $U_{\text{ВЫХ}}$ ", рукоятку " $U_{\text{ВЫХ}}$ " установить в крайнее левое положение, рукоятку " $I_{\text{ВЫХ}}$ " установить в крайнее правое положение. Вращением рукоятки " $I_{\text{ВХ}}$ ", изменяя и фиксируя ток во входной цепи, записывать в таблицу значения фотоэдс.

3. Измерить зависимость тока короткого замыкания выходной цепи от величины тока во входной цепи. Для этого тумблер "П1" установить в положение " $U_{\text{ВЫХ}}$ ", рукоятками " $I_{\text{ВЫХ}}$ " и " $U_{\text{ВЫХ}}$ " установить нулевое напряжение на выходе оптрона и записать в таблицу показания микроамперметра. Устанавливая во входной цепи разные значения тока, получить соответствующие им значения тока короткого замыкания, поддерживая $U_{\text{вых}} = 0$.

4. Измерить коэффициент передачи тока диодной оптопары. Тумблер П1 установить в положение " $U_{\text{обр}}$ ", рукоятку " $I_{\text{ВЫХ}}$ " поставить в крайнее левое положение, рукояткой " $U_{\text{ВЫХ}}$ " установить фиксированное напряжение обратного смещения на фотодиоде. Изменяя и фиксируя ток во входной цепи оптрона, снять показания тока выходной цепи. Результаты измерений записать в таблицу. Измерения повторить при нескольких значениях напряжения смещения в пределах 2 – 16 В. Построить семейство зависимостей $I_{\text{вых}}(I_{\text{вх}})$ для различных значений напряжений и определить коэффициент передачи тока.

5. Измерить выходную характеристику оптрона, для чего тумблер П1 установить в положение " $U_{\text{ВЫХ}}$ ". Для снятия выходной характеристики необходимо задавать значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и отсчитывать при этом значения выходного тока $I_{\text{ВЫХ}}$. Значение входного тока при этом установить и поддерживать постоянным.

Контрольные вопросы

1. Назначение оптронов и область применения диодных оптопар.
2. Проанализируйте факторы, определяющие быстродействие диодных оптопар.
3. Перечислите и охарактеризуйте предельные параметры оптронов.
4. Чем определяется и от чего зависит коэффициент передачи по току в диодных оптронах?
5. Опишите типичные конструкции оптопар.
6. Какие материалы считаются базовыми в технологии оптронов?
7. Охарактеризуйте оптроны с управляемым оптическим каналом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ ОПТОТИРИСТОРА

Цель работы: а) ознакомиться с принципом действия и способами применения оптотиристоров; б) ознакомиться с методами измерений параметров и основными характеристиками промышленных оптотиристоров.

Используемое оборудование и материалы: макет стенда для измерения характеристик оптотиристора, генератор синусоидальных колебаний типа ГЗ-34, осциллограф типа С1-72, соединительные провода и кабели.

Применение, принцип действия, конструкции оптотиристоров

Тиристор, или кремниевый управляемый выпрямитель, является полупроводниковым прибором, который используется для преобразования электрического тока и напряжения. Чаще всего тиристор представляет собой четырехслойную структуру с тремя выводами и пропускает ток между анодом и катодом, когда на его управляющий электрод подается сигнал управления. В отсутствие сигнала управления прибор может блокировать высокое напряжение при малом токе утечки.

Оптически включаемые тиристоры являются элементами схем, где необходима высоковольтная изоляция цепей управления. Они применяются в условиях, когда электрические наводки велики и создают помехи в цепях управления. Обе ситуации возникают в преобразователях высоковольтных ЛЭП постоянного тока, энергонасыщенных технологических установках ионной имплантации, где требуется изоляция напряжений, превышающих 100 кВ относительно земли. Оптотиристор заменяет собой электрическую схему, включающую светоизлучающий диод, фототранзисторный детектор излучения с це-

пями питания, согласованный по выходу с электрически управляемым тиристором. При оптически чувствительном тиристоре он сам становится фотодетектором и отбирает необходимую энергию непосредственно из силовой цепи, давая значительную экономию в комплектности схемы и, следовательно, повышая ее надежность.

Обычная четырехслойная тиристорная структура показана на рис. 4.1. Она состоит из двух глубоких диффузионных слоев p -типа (слой $p1$ является анодным эмиттером, слой $p2$ – p -базой), между которыми находится широкая слабо проводящая n -база $n1$. Диффузионный n^+ -слой образует катодный эмиттер $N2$. Слои $p1$ и $n2$ снабжены омическими контактами, образующими анодный и катодный выходы, а третий контакт, соединенный с p -базой, является управляющим электродом. Когда к аноду приложен отрицательный по отношению к катоду потенциал, тиристор обладает высоким сопротивлением.

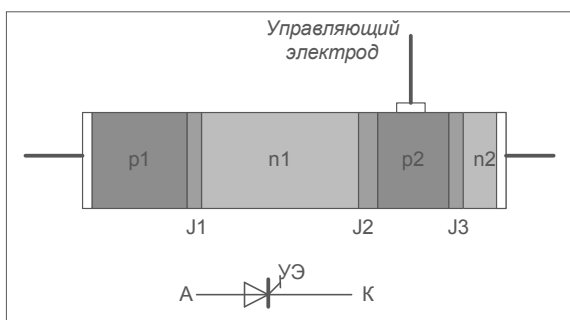


Рис. 4.1. Структура базового тиристора

Если к аноду приложен высокий положительный потенциал, то прибор также имеет высокое сопротивление до тех пор, пока на его управляющий электрод не подается сигнал управления. После этого происходит включение тиристора. Переход из закрытого состояния в открытое происходит очень быстро, и тиристор остается в открытом состоянии, даже если

закончится сигнал управления. Переключение из закрытого состояния в открытое производится не по внешнему электроду, а с помощью внешней цепи. Прибор выключается, когда ток уменьшается ниже критического уровня, называемого током удержания.

В обратном закрытом состоянии к аноду прикладывается отрицательный потенциал по отношению к катоду и оба перехода J_1 и J_2 становятся обратносмещенными. Поскольку слой n_1 является слабо легированным, т.е. обладает значительно большим сопротивлением, чем слой n_2 , практически все напряжение прикладывается к переходу и в этом случае вольт-амперная характеристика тиристора аналогична характеристике диода. Между анодом и катодом может быть приложено высокое напряжение при протекании очень малого тока утечки. Однако если это напряжение превысит напряжение пробоя U_R перехода J_2 , то ток, вследствие эффекта лавинного умножения, быстро увеличится. В прямом закрытом состоянии переход J_2 становится обратносмещенным и блокирует приложенное напряжение. Дальнейшее превышение критического уровня может привести к быстрому увеличению тока, но если ток превысит некоторый пороговый уровень, так называемое напряжение переключения, то произойдет включение тиристора.

В оптотиристорах включение тока происходит в следствие облучения потоком квантов чувствительной области прибора. Простейшая функционально-эквивалентная схема фото-чувствительного тиристора показана на рис. 4.2.

В зависимости от величины коммутируемых оптотиристором токов в их конструкциях используют либо вспомогательный тиристор, включаемый светом и электрически управляющий основным тиристором, либо используют непосредственное включение светом главного мощного тиристора. В варианте с вспомогательным тиристором светочувствительный прибор будет нагружаться малым током, причём существенно

только среднее значение тока, необходимое, чтобы переключить главный тиристор в проводящее состояние, следовательно, вспомогательный тиристор может иметь небольшие размеры.

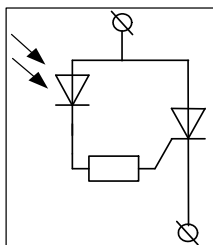


Рис. 4.2. Эквивалентная схема фоточувствительного тиристора. Ток фотодиода используется для включения тиристора

В варианте с вспомогательным тиристором светочувствительный прибор будет нагружаться малым током, причём существенно только среднее значение тока, необходимое, чтобы переключить главный тиристор в проводящее состояние, следовательно, вспомогательный тиристор может иметь небольшие размеры. Резистор устанавливается между светочувствительным прибором и мощным тиристором с целью ограничить ток до такого значения, которое вспомогательный прибор может выдержать в процессе включения. Дополнительным преимуществом этого устройства является то, что вспомогательный прибор работает при температуре значительно более низкой, чем основной прибор.

Основным недостатком прибора со вспомогательным тиристором является дополнительная стоимость и использование двух компонентов по сравнению с вариантом, в котором основной мощный тиристор сам является светочувствительным, как на рис. 4.3.

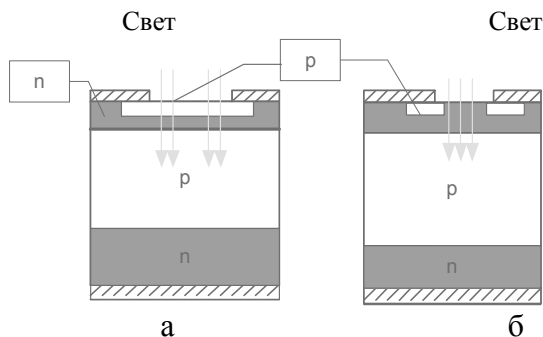


Рис. 4.3. Структуры фототиристоров: а – n -эмиттер в области фотоокна; б – n -эмиттер вне области фотоокна

В обеих приведенных конструкциях излучение генерирует электронно-дырочные пары в области базы p_2 , где накапливаются основные носители. Их избыточный заряд снижает потенциальный барьер для электронов в эмиттере n_2 , что приводит к его отпираанию. Индуцированный освещением поток электронов из области эмиттера практически полностью достигает области n_1 , что и приводит к включению тиристора. Таким образом, принцип действия управляемого светом тиристора аналогичен работе биполярного фототранзистора.

Описание стенда для изучения оптоотиристора

Принципиальная схема стенда для изучения работы оптоотиристора приведена на рис. 4.4. Он позволяет с помощью источника напряжения ИП, переменного резистора R_1 и стрелочных измерителей тока и напряжения измерить входную характеристику оптоотиристора на постоянном токе.

В выходной цепи, питающейся двухполупериодным выпрямленным напряжением, с помощью осциллографа, регистрирующего падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n , можно наблюдать процесс включения фототиристора при увеличении тока во входной цепи.

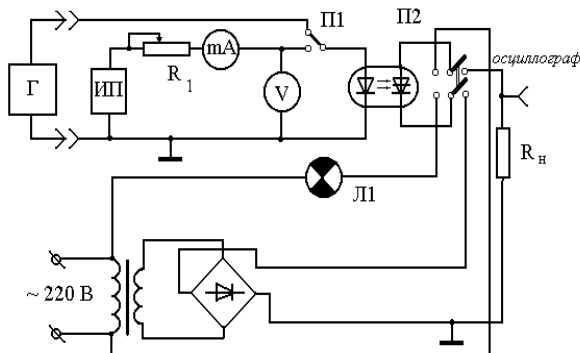


Рис. 4.4. Стенд для изучения работы оптотиристора

При этих измерениях переключатель П2 должен включить низковольтную нагрузку. При включении на непродолжительное время галогенной лампы Л1 визуально можно наблюдать возможности регулировки мощности излучения оптотиристором. Если на входную цепь оптотиристора подавать переменный сигнал от генератора, то на нагрузочном сопротивлении R_1 , будут наблюдаться как процесс включения оптотиристора, так и модуляции протекающего через него тока при одновременном уменьшении напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Измерить входную характеристику оптотиристора, для чего переключатель П1 установить в положение “Постоянный ток” и плавно вращая рукоятку резистора R_1 регистрировать зависимость входного тока от величины прикладываемого напряжения.

2. Определить величину тока отпирания оптотиристора, для чего подключить к резистору $R_н$ осциллограф, установить переключатель П2 в положение “внутренняя нагрузка” и наблюдать появление в выходной цепи тока при увеличении тока во входной цепи. Зарегистрируйте вид наблюдаемых осцилло-

грамм. Зафиксировать входной ток отпирания и ток полного раскрытия оптотиристора. По окончании измерений снизить входной ток до минимального значения.

3. Убедиться в возможности плавного изменения действующей величины тока в выходной цепи оптотиристора, для чего установить переключатель П2 в положение “Лампа” и, плавно увеличивая ток во входной цепи, наблюдать свечение лампы накаливания. **ВНИМАНИЕ!** Длительное свечение лампы в режиме максимальной яркости допускается на время не более 5 секунд!

4. Изучить вид осциллограмм при подключении к входной цепи генератора переменных сигналов. Установите амплитуду снимаемого с генератора напряжения на уровне, достаточном для отпирания оптотиристора. Плавно изменяя частоту, наблюдайте осциллограммы на сопротивлении R_n и регистрируйте их. Дайте объяснения наблюдаемым эффектам биений и модуляции тока в цепи.

Контрольные вопросы

1. Изобразите семейство ВАХ выходной цепи оптотиристора для разных величин тока, протекающего по входу.

2. Как доказать, что во входной цепи измерявшегося оптотиристора использован светоизлучающий диод?

3. Изложите соображения по выбору конкретных параметров конструкции оптотиристора, показанной на рис. 4.1, полагая, что он изготовлен из кремния.

4. Дайте классификацию существующих видов тиристоров и укажите на сравнительные преимущества и недостатки оптотиристоров

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника [Текст] / О.Н. Ермаков. М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
2. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. Н. Игнатов. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 538 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / С. Зи. М.: Мир, 1984. - Т. 2. – 456 с.
4. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Пихтин. М.: Высш. шк., 2001. – 573 с.
5. Смирнов Ю.А. Основы нано- и функциональной [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - СПб.: Лань, 2013. - 311 с.
6. Щука А.А. Электроника [Текст]: учеб. пособие / А.А. Щука. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование спектрального состава излучения полупроводниковых светодиодов.....	3
Лабораторная работа № 2. Измерение постоянной времени фоторезисторов.....	16
Лабораторная работа № 3. Измерение передаточных характеристик диодных оптопар.....	24
Лабораторная работа № 4. Изучение оптодиристора.....	32
Библиографический список	39

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Функциональная электроника»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
очной формы обучения

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

Подписано к изданию 04.12.2020.
Уч.-изд. л. 2,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14