

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»**

**В.Н. МЫШКОВЕЦ, А.В. МАКСИМЕНКО,
В.В. ГРИШЕНКО**

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Гомель 2004

УДК 621.38 (075.8)
ББК 32.86 Я73
М 968

Рецензенты:

Н.Н. Федосенко, доцент, кандидат технических наук
кафедра радиофизики и электроники учреждения образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска
Скорины»

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины» «22» декабря
2004 года, протокол № 4.

Мышковец В.Н.

Оптоэлектроника: Практическое пособие по выполнению
лабораторных работ для студентов специальности «Физическая
электроника» /Минист. образ. Республики Беларусь, УО «ГГУ
им. Ф. Скорины». Авт.-составители: В.Н. Мышковец, А.В.
Максименко, В.В. Грищенко, Гомель, 2004.- 67 с.

Практическое пособие включает в себя теоретический
материал и требования по выполнению 7 лабораторных работ по
базовым разделам курса «Оптоэлектроника».

Предназначено студентам 3 курса специальности 1 –31 04 03-
«Физическая электроника».

УДК 621.38 (075.8)
ББК 32.86 Я73

© В.Н. Мышковец, А.В. Максименко,
В.В. Грищенко
© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2004

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ТЕМА 1. ФОТОРЕЗИСТОРЫ.....	5
ТЕМА 2 ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ.....	14
ТЕМА 3 ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА...	22
ТЕМА 4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ.....	28
ТЕМА 5. МОДУЛЯТОРЫ И ДЕФЛЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	38
ТЕМА 6. ОПТРОНЫ.....	46
ТЕМА 7. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	57

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая электроника, или оптоэлектроника – одно из самых актуальных направлений современной электроники. Оптоэлектронные приборы, устройства и системы характеризуются уникальной функциональной широтой и эффективно используются в информационных системах для генерации, преобразования, передачи, хранения и отображения информации.

В своем развитии оптоэлектроника, с одной стороны, дополняет современную электронику, а с другой – постепенно приобретает все большее самостоятельное значение.

Элементная база оптоэлектроники состоящая из оптоэлектронных приборов (излучатели, фотоприемники, фотопреобразователи и др.) применяется во многих отраслях промышленности и народного хозяйства.

Основная цель пособия – оказать помощь студентам в изучении физических процессов, лежащих в основе действия оптоэлектронных приборов, устройств и систем, их конструктивно-технологических особенностей, методов расчета и измерений характеристик, а также параметров приборов.

Пособие содержит теоретический материал и требования по выполнению лабораторных работ, которые помогут студентам глубже и прочнее усвоить лекционный материал курса «Оптоэлектроника», а также приобрести практические навыки по определению основных характеристик и параметров оптоэлектронных приборов.

ТЕМА 1. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

1. Принцип действия и конструкция фоторезистора.
2. Типы фоторезисторов.
3. Основные параметры и характеристики.
4. Схемы включения фоторезисторов

Область применения каждого типа фоторезистора определяется его свойствами и параметрами: вольт-амперной и световой характеристикой, чувствительностью, отношением темнового сопротивления R_T к световому R_C постоянной времени τ , температурной зависимостью фототока (температурным коэффициентом тока), рабочим напряжением и др.

Если фоторезистор включен в электрическую цепь последовательно с источником напряжения, то в темноте через него будет течь темновой ток I_T , при освещении же его поверхности в цепи будет течь световой ток I_C . Разность между установившимся световым током I_C и темновым током I_T называется *фототоком* I_Φ ($I_\Phi = I_C - I_T$).

Вольт-амперной характеристикой фоторезистора называется зависимость темнового тока, светового тока и фототока от приложенного к фоторезистору напряжения при неизменной величине светового потока, падающего на фоторезисторы. Для большинства фоторезисторов эта зависимость имеет вид

$$I = CU, \quad (1)$$

где C — коэффициент пропорциональности, зависящий от типа фоторезистора и интенсивности света.

При изучении вольт-амперных характеристик фоторезисторов обычно получают вольт-амперные характеристики в темноте и при различных освещенностях поверхности светочувствительного слоя фоторезистора, снимая их одновременно (см. рис. 1). Для этого при затемненном фоторезисторе ($E=0$) измеряют темновой ток, а при освещении — световой. Затем находят фототок: $I_\Phi = I_C - I_T$. При изменении напряжения, приложен-

ного к фоторезистору, от нуля до номинального значения для данной освещенности E через каждые 1—5 В находят зависимости: $I_T = f(U)$ и $I_\Phi = f(U)_{E=const}$

Освещение фоторезистора изменяется и измеряется люксметром, расположенным на одном уровне с фоторезистором.

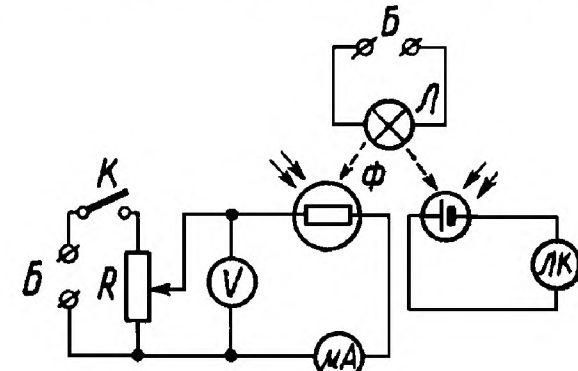


Рис. 1. Принципиальная схема для снятия характеристик фоторезисторов:

L — осветительная лампа; Φ — фоторезистор; μA — микроамперметр (многопредельный); V — вольтметр; R — потенциометр; K — ключ; B — источник постоянного тока (15 – 150 В); LK — люксметр.

Зависимости $I_T = f(U)$ и $I_\Phi = f(U)_{E=const}$ строят на одном графике.

Вольт-амперные характеристики у большинства фоторезисторов имеют линейный характер, т. е. в широкой области изменения напряжения выполняется закон Ома, а фоторезисторы в области слабых электрических полей являются омическими сопротивлениями. У некоторых фоторезисторов в области малых или больших напряжений, приложенных к ним, наблюдаются отклонения от линейности.

Световой (люкс-амперной) характеристикой фоторезистора

называется зависимость фототока от интенсивности освещения (светового потока или освещенности) при неизменном напряжении, приложенном к фоторезистору.

На практике люкс-амперные характеристики преимущественно приводятся в виде зависимости не фототока, а светового тока или сопротивления от освещенности.

Зависимость фототока фоторезисторов от освещенности определяется зависимостью фотопроводимости от интенсивности света: $\Delta\sigma \sim L^\alpha$ и в общем случае имеет нелинейный характер

$$I_\Phi = C_1 \Phi^\alpha U = C_1 U S^\alpha E^\alpha, \quad (2)$$

где C_1 — коэффициент пропорциональности, U — приложенное напряжение, Φ — световой поток; α — показатель степени, значение которого 1, >1, <1; S — площадь фоторезистора; E — освещенность.

Для снятия световой характеристики фоторезистора используют схему рис. 1. Устанавливают напряжение U (в пределах допустимых значений) и, изменяя освещенность фоторезистора источником света, измеряют каждый раз люксметром освещенность E и микроамперметром токи I_Φ и I_c вычисляют ток I_Φ .

Снимают зависимость $I_\Phi = f(E)_{U=const}$ и выражают графически в одной системе координат при различных приложенных напряжениях в пределах допустимых значений.

Интегральной чувствительностью называется отношение фототока, который течет в цепи фоторезистора при рабочем напряжении, к падающему на светочувствительный элемент световому потоку от лампы накаливания, вольфрамовая нить которой накалена до цветовой температуры $T=2848$ К

$$K_{\text{И}} = \frac{I_\Phi}{\Phi}. \quad (3)$$

Удельной интегральной чувствительностью фоторезистора называется отношение фототока к величине падающего светового потока и к величине приложенного напряжения

$$K_y = \frac{I_\Phi}{\Phi U}. \quad (4)$$

Спектральной чувствительностью называется отношение фототока $I_{\phi\lambda}$, при длине волны λ к падающему на светочувствительный элемент потоку монохроматического излучения Φ_λ в узком интервале длин волн $\lambda, \lambda+d\lambda$

$$K_\lambda = \frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda}. \quad (5)$$

Спектральная чувствительность в отличие от интегральной зависит от длины волны падающего света и выражается зависимостью $K_\lambda = f(\lambda)$ или $I_{\phi\lambda} = f(\lambda)$ называемой спектральной характеристикой.

Чувствительности фоторезисторов K_H и K_V находятся расчетным путем по данным, полученным при снятии вольт-амперных и световых характеристик. Зная площадь светочувствительной площадки фоторезистора S в (м^2), освещенность E (в лк) и приложенное напряжение U в (В), вычисляют для видимой части спектра величину лучистого потока ($\Phi = ES$) и чувствительности K_H и K_V по формулам (3) и (4). Для видимой части спектра чувствительности K_H и K_V имеют размерности:

$$[K_H] = \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right], [K_V] = \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right]$$

Для вычисления K_λ необходимо знать распределение энергии по спектру излучения $\Phi_\lambda = f(\lambda)$. Размерность

$$[K_\lambda] = \left[\frac{\text{мкА}}{\text{Вт}} \right].$$

Во многих случаях практического использования фоторезисторов большое значение придается кратности изменения сопротивления фоторезистора при освещении

$$\frac{R_T}{R_C} = \frac{I_C}{I_T} \quad (6)$$

и относительному изменению сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_C}{R_C} \cdot 100\% \quad (7)$$

Для рабочего напряжения U_p и освещенности E находят темновой и световой токи, а затем вычисляют кратность изменения сопротивления. Темновое сопротивление фоторезистора и сопротивление его при освещении рассчитывают по закону Ома:

$$R_T = \frac{U_p}{I_T} \quad (8)$$

$$R_C = \frac{U_p}{I_C} \quad (9)$$

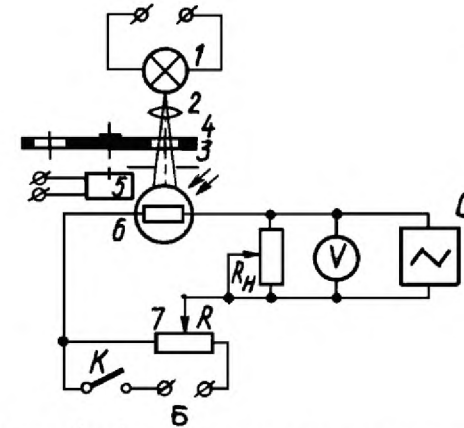


Рис. 2. Принципиальная схема определения постоянной времени τ методом затухания фотопроводимости:

1 – лампа осветителя; 2 – конденсорная линза; 3 – щель; 4 – прерыватель света (полудиск); 5 – электромотор; 6 – фоторезистор; 7 – потенциометр; R_n – сопротивление нагрузки (магазин сопротивлений); O – осциллограф; B – источник постоянного тока (15 – 150 В); K – ключ; V – милливольтметр.

Постоянная времени спада фототока τ (релаксационное время жизни носителей заряда, $\tau = \frac{1}{\gamma \Delta p}$, где $\gamma \Delta p$ – средняя вероятность рекомбинации для отдельного электрона) — время, в течение ко-

торого фототок уменьшается в e раз (на 63%) после прекращения освещения фоторезистора. Она характеризует инерционность фоторезистора, связанную со временем жизни избыточного носителя заряда ($\tau = \frac{1}{NSv}$, где N — концентрация центров рекомбинации, S — сечение захвата, v — средняя относительная скорость теплового движения заряда по отношению к центру рекомбинации).

Если освещать фоторезистор короткими прямоугольными импульсами света с малой частотой следования (длительности светового импульса и темнового промежутка равны t ($t \gg \tau$)), то за время освещения образца будет успевать устанавливаться стационарное значение фотопроводимости, а за время темноты фотопроводимость успевать уменьшаться до нуля. Спад фотопроводимости, обусловленный уменьшением неравновесной концентрации при затемнении, приближенно можно считать происходящим по закону $\Delta\sigma = \tau_n \beta K L q \mu_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}$, а фототок в цепи фоторезистора — изменяющимся по закону

$$I_{\phi} = I_{\phi cm} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10)$$

Для определения величины τ методом затухания фотопроводимости (рис.2) исследуемый фоторезистор помещают на подставку. На фоторезистор подают определенное напряжение (в зависимости от типа фоторезистора) через нагрузочное сопротивление R_n .

Освещая фоторезистор прямоугольными импульсами света, наблюдают на осциллографе экспоненциальное изменение (уменьшение) напряжения со временем затемнения на последовательно включенном с фоторезистором сопротивлении R_n . Включив метки времени на осциллографе, измеряют время t_1 , в течение которого напряжение, пропорциональное фототоку, уменьшается в два раза. Падение напряжения на сопротивлении R_n при затемнении изменяется приближенно по закону

$$U_n = IR_n = U_{cm} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (11)$$

Если $\frac{U_{cm}}{U_n} = 2$ (уменьшилось в два раза), то релаксационное

время жизни

$$\tau = \frac{t_1}{\ln 2} \quad (12)$$

где t_1 — время, соответствующее уменьшению напряжения на сопротивлении R_n в два раза.

При измерениях величин t_1 и τ следует исследовать кривые затухания разной амплитуды путем изменения приложенного напряжения к образцу. Во избежание искажения измеряемого времени жизни τ измерительное поле должно быть достаточно малым.

Метод затухания фотопроводимости широко применяют для измерения как объемного τ_v , так и поверхностного τ_s времени жизни. При измерении локальных значений эффективного времени жизни τ можно освещать лишь исследуемый участок образца.

В связи с тем что скорость нарастания тока при освещении фоторезистора несколько отличается от скорости спада его при затемнении, различают постоянную времени нарастания τ_n и спада $\tau_{сп}$. Численные значения τ_n и $\tau_{сп}$ для фоторезисторов, приводимых, в справочных таблицах, определяются при освещенности 200 лк от источника излучения с цветовой температурой 2850 К.

Для определения τ_n и $\tau_{сп}$ подают на фоторезистор рабочее напряжение и освещают его прямоугольными импульсами света с заданной освещенностью, получают на экране осциллографа устойчивую кривую нарастания и спада фототока во времени. Включив метки времени на осциллографе определяют значения τ_n и $\tau_{сп}$ путем подсчета числа калибровочных меток времени на участках нарастания и спада фототока до требуемого уровня 63% от установившегося значения тока.

У всех фоторезисторов постоянные времени по нарастанию и спаду не равны. В большинстве случаев значение τ_n превышает величину $\tau_{сп}$ при определенном сопротивлении R_n . Постоянные времена τ_n и $\tau_{сп}$ зависят от материала фоторезистора,

освещенности E , сопротивления R_n , величины приложенного напряжения, окружающей температуры и характера освещения (частичное или полное освещение светочувствительного слоя).

Инерционность фоторезистора, характеризуемая постоянной времени τ , свидетельствует о скорости реакции фоторезистора на воздействие светового потока. Фотоэлектрическая инерционность фоторезистора приводит к тому, что когда на светочувствительный слой фоторезистора падает переменный световой поток с частотой модуляции ν , то фототок зависит от частоты модуляции светового потока (частотная характеристика фоторезистора). С увеличением частоты модуляции светового потока величина переменной составляющей фототока уменьшается в различной степени для разных типов фоторезисторов.

Для исследования частотной характеристики фоторезистора $I_\phi = f(\nu)$ используется схема рис. 2. Переменное напряжение, снимаемое с нагрузочного сопротивления R_n измеряется милливольтметром или осциллографом. Оно пропорционально фототоку ($U_n = I_\phi R_n$).

Частота модуляции светового потока изменяется механическим прерывателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства фоторезисторов, снятие их характеристик и определение параметров.

Приборы и принадлежности: микроамперметр; вольтметр для постоянного тока (15—150 В); реостат; источник постоянного тока; электромотор с прерывателем света; магазин сопротивлений (РЗЗ); осциллограф; люксметр; фоторезисторы (ФСК, ФСД, ФСА и др.); монохроматические фильтры или монохроматор УМ-2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 1) и снять:

- вольт-амперную характеристику при заданной освещенности;
- световую характеристику при рабочем напряжении на фоторезисторе;
- спектральную, зависимость фототока, проводя измерения с разными монохроматическими светофильтрами или при освещении монохроматическим светом от монохроматора при рабочем напряжении на фоторезисторе.

2. Построить вольт-амперную $I_{\phi} = f(U)_{E=\text{const}}$, световую $I_{\phi} = f(E)$ и спектральную характеристики для исследуемого фоторезистора. Чтобы построить спектральную характеристику фоторезистора, необходимо на графике зависимости фототока от длины волны построить кривую распределения энергии в спектре источника света, а затем разделить ординаты первой кривой на соответствующие ординаты второй кривой. Результирующая кривая будет являться спектральной характеристикой фоторезистора.

3. Вычислить для исследуемого фоторезистора:

- интегральную и удельную чувствительности ($K_{\text{и}}, K_{\text{у}}$);
- темновое сопротивление $R_{\text{т}}$, сопротивление при освещении $R_{\text{с}}$, фотопроводимость $\Delta\sigma$, кратность изменения сопротивления, относительное изменение сопротивления $\frac{R_{\text{т}} - R_{\text{с}}}{R_{\text{с}}} \cdot 100\%$ для рабочего напряжения и освещенности $E = 200$ лк.

4. Собрать схему (рис. 2), получить на экране осциллографа устойчивую релаксационную кривую при освещении фоторезистора прямоугольными световыми импульсами.

5. Зарисовать кривые релаксации фототока при освещении фоторезистора прямоугольными световыми импульсами и определите постоянную времени нарастания $\tau_{\text{н}}$ и спада $\tau_{\text{сп}}$. По данным измерения $\tau_{\text{сп}}$ оценить релаксационное (эффективное) время жизни

носителей заряда в полупроводниковом материале фоторезистора.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое эффект фотопроводимости в полупроводниках?
2. Что такое фоторезисторы, их характеристики и параметры?
3. Какие основные достоинства и недостатки фоторезисторов?
4. Где применяются фоторезисторы?

Литература

1. А.Н. Пихтин. Оптическая и квантовая электроника. – М.: «Высшая школа», 2001.
2. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.Н. Введение в оптоэлектронику. - М.: «Высшая школа», 1991.
3. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Радио и связь, 1989.
4. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. – Л.: «Машиностроение», 1986.

ТЕМА 2. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

1. Эффект Демосра.
2. Механизм образования фото – э.д.с. в полупроводниках с электронно-дырочным переходом.
3. Основные соотношения для фотодиодов.
4. Основные параметры и характеристики фотоэлементов и фотодиодов.

Явление возникновения фото-ЭДС между двумя разнородными полупроводниками или между полупроводником и металлом, разделенными электрическим переходом, под действием электромагнитного излучения оптического диапазона, называется фотогальваническим эффектом.

Данный эффект применяется в таких оптоэлектронных прибо-

рах как фотоэлементы и фотодиоды.

Каждый фотоэлемент характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих не только его свойства, но и пределы его применимости в технике. К основным из них относятся: вольт-амперная, световая, частотная и спектральная характеристики, интегральная и спектральная чувствительности, к.п.д.

Нагрузочные вольт-амперные характеристики выражают зависимость тока нагрузки I_n от напряжения на фотоэлементе φ_n при включении его на различные нагрузочные сопротивления и постоянной освещенности ($I_n = f(\varphi_n)_{E=const}$). Эта зависимость имеет вид

$$I_n = I_\phi - I_s \left(e^{\frac{q_0 \varphi_n}{A k T}} - 1 \right) \quad (1)$$

При $R_n=0$ точка, лежащая на оси токов, соответствует току $I_{к.з.}$, так как при $R_n=0$ $\varphi_n=0$ и из выражения (1) имеем: $I_n = I_{к.з.} = I_\phi$, т.е. точка пересечения вольт-амперной характеристики с осью токов дает значение $I_{к.з.}$.

При $R_n \rightarrow \infty$ точка, лежащая на оси токов, соответствует фото-э.д.с., так как при $R_n \rightarrow \infty$ $I_n=0$ и из выражения (1) имеем: $\varphi_n = \varphi_{х.х.}$, т.е. точка пересечения вольт-амперной характеристики с осью напряжений дает значение фото-э.д.с.

Если освещенный фотоэлемент замкнут на сопротивление R_n , то в цепи установится ток I_n , величина которого определяется качеством фотоэлемента, интенсивностью освещения и величиной этого сопротивления. Вольт-амперные характеристики для нескольких значений освещенности представляют собой ряд кривых, смещенных друг относительно друга, причем ток $I_{к.з.}$ в широких пределах изменения светового потока пропорционален ему ($I_{к.з.} = K_\lambda \Phi_\lambda$), а фото-э.д.с. стремится к насыщению.

Световые (интегральные) характеристики выражают зависимость фото-э.д.с., тока короткого замыкания и тока нагрузки от освещенности или светового потока: 1) $\varphi_{х.х.} = f(E)$, 2) $I_{к.з.} = f(E)$, 3) $I_n = f(E)$. Зависимость тока $I_{к.з.}$ ($I_{к.з.} = I_\phi$) от

освещенности в широких пределах изменения освещенности линейна, а характеристики, выражающие зависимость тока нагрузки от освещенности, нелинейны. Нелинейность между током во внешней цепи и освещенностью будет тем больше, чем больше нагрузочное сопротивление, что ограничивает применение фотоэлементов для некоторых фотометрических измерений.

Частотные характеристики выражают зависимость тока в цепи фотоэлемента от частоты модуляции светового потока при постоянной освещенности и сопротивлении нагрузки $I_n = f(\nu_M)$. Когда на поверхность фотоэлемента падает переменный световой поток с частотой модуляции ν_M , то сила возникающего при этом тока I_n зависит от ν_M . С увеличением ν_M сила тока I_n уменьшается из-за инерционности фотоэлементов.

Спектральные характеристики выражают зависимость фототока на единицу падающего светового потока от длины волны падающего света.

$$\frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda} = f(\lambda).$$

Для снятия характеристик фотоэлемента собирают схему (рис. 1).

При снятии вольт-амперной (нагрузочной) характеристики устанавливают определенное значение освещенности, которое измеряют люксметром, а затем измеряют величину тока I_n в цепи фотоэлемента при изменении сопротивления R_n от 0 до ∞ .

Вычислив напряжение $\varphi_n [\varphi_n = I_n (R_\epsilon + R_n)]$ при различных значениях тока I_n строят график зависимости $I_n = f(\varphi_n)_{E=const}$, по которому определяют $I_{кз}$ и $\varphi_{х.х}$, где R_ϵ – внутреннее сопротивление фотоэлемента.

При снятии световой характеристики устанавливают определенное значение сопротивления (например, $R_n = 1000 \text{ Ом}$), затем находят величину тока I_n в цепи фотоэлемента при изменении освещенности от 0 до максимального значения и строят график: $I_n = f(E)_{R_n=const}$.

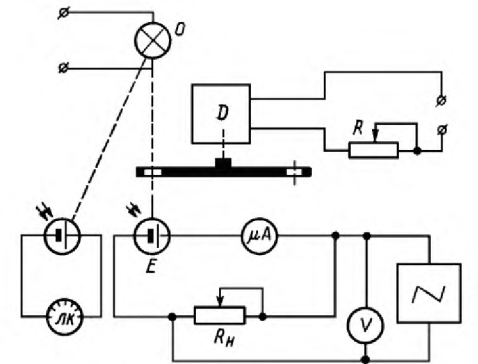


Рис. 1. Принципиальная схема для снятия характеристик и наблюдения релаксации фототока в цепи фотоэлемента:

Д — двигатель с прерывателем света; R — реостат; О — осветительная лампа; ЛК — люксметр; Е — фотоэлемент; мА — микроамперметр; R_H — магазин сопротивлений (Р-33); V — вольтметр; О — осциллограф

При снятии частотной характеристики устанавливают определенное значение сопротивления R_H (например, $R_H = 1000$ Ом) и освещенности E , находят величину тока I_H . Затем включают модулятор света и находят величину тока I_H при различных частотах прерывания светового потока. Прерыватель света представляет собой электромотор постоянного тока, на оси которого насажен дисковый обтюратор с m вырезами. За один оборот обтюратор перекрывает световой поток m раз. Число оборотов электромотора регулируется реостатом R и измеряется тахометром, при этом частота модуляции света равна $\nu_M = mn$ (n — число оборотов за 1 с).

При снятии спектральных характеристик используется монохроматор или набор монохроматических фильтров, а осветительной лампой служит лампа накаливания с известным распределением энергии по длинам волн.

Освещая фотоэлемент светом различной длины волны, нахо-

дят зависимость фототока от длины волны $I_{\phi\lambda} = f(\lambda)$. Ток измеряется микроамперметром, внутреннее сопротивление которого значительно меньше сопротивления фотоэлемента.

Для получения спектральной характеристики необходимо построить график зависимости $I_{\phi\lambda} = f(\lambda)$ и на нем кривую распределения энергии по длинам волн, а затем разделить ординаты кривой $I_{\phi\lambda} = f(\lambda)$ на соответствующие ординаты кривой распределения энергии $\Phi_\lambda = f(\lambda)$. Найденные значения отношений $\frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda} = f(\lambda)$ — спектральная характеристика фотоэлемента.

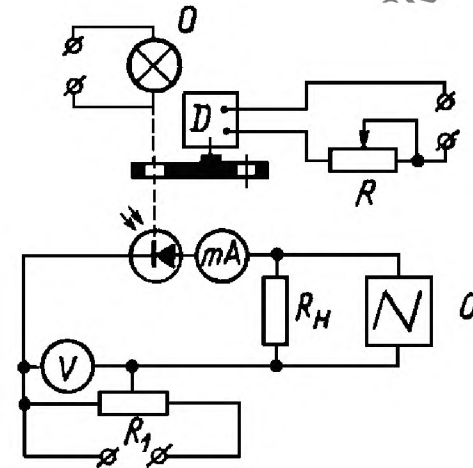


Рис. 2. Принципиальная схема для снятия характеристик и наблюдения релаксации фототока в цепи фотодиода

Для снятия характеристик фотодиода собирают схему рис. 2. На фотодиод подается регулируемое напряжение с потенциометра R_1 . При снятии вольт-амперной, световой и спектральной характеристик темновой ток и ток при освещении фотодиода измеряют микроамперметром, при снятии частотной характери-

ки он регистрируется осциллографом. Освещенность измеряется люксметром.

В фотодиодах инерционность в фотодиодном режиме определяется временем диффузии t_0 неосновных носителей к p — n —переходу

$$I_{\phi} = I_{\phi.cm} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \quad (1)$$

(при включенном свете) и

$$I_{\phi} = I_{\phi.cm} e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (2)$$

(при выключенном свете),

здесь $I_{\phi.ст}$ — стационарное значение фототока при данной освещенности, а инерционность в режиме фото-э.д.с. — временем жизни τ неосновных носителей заряда

$$I_{\phi} = I_{\phi.cm} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

и

$$I_{\phi} = I_{\phi.cm} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

Величины t_0 и τ называют постоянными времени релаксации или постоянными времени фотодиода (t_0) и фотоэлемента (τ). Постоянная времени (t_0 или τ) — время, в течение которого фототок в цепи фотодиода или фотоэлемента при затемнении уменьшается в e (2,7) раз. Для определения постоянной времени фотоэлемента τ и фотодиода t_0 используются схемы (рис. 1 и 2).

При освещении фотоэлемента прямоугольными световыми импульсами (см. рис. 1) фототок в цепи фотоэлемента будет из-

меняться по законам (3) и (4). Если с нагрузочного сопротивления фотоэлемента подать напряжение на вертикальный вход осциллографа, то на экране осциллографа получится кривая релаксации фототока. Так как при затемнении фотоэлемента за время $t = \tau$ происходит уменьшение фототока приблизительно в 2,7 раза, то постоянную времени τ можно определить, исследуя спад фототока со временем на экране осциллографа при включенных метках времени.

Получив на экране осциллографа устойчивую релаксационную кривую, включают метки времени и отсчитывают число меток N , укладывающихся на участке релаксационной кривой, на котором фототок уменьшается в 2,7 раза, или на 63% от стационарного значения фототока. Тогда постоянная времени фотоэлемента $\tau = N \tau^\circ$, где τ° — цена деления метки времени осциллографа.

В фотодиодном режиме изменение фототока при затемнении фотодиода происходит по закону (2).

При определении постоянной времени t_0 фотодиода на него подается рабочее напряжение и он освещается прямоугольными световыми импульсами. На экране осциллографа получают устойчивую релаксационную кривую, по которой определяют t_0 путем подсчета числа меток N_1 , укладывающихся на участке релаксационной кривой, на котором фототок уменьшается в 2,7 раза ($t_0 = N_1 \tau^\circ$).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: снятие основных характеристик фотогальванических элементов и фотодиодов.

Приборы и принадлежности: потенциометр; микроамперметр; вольтметр (30 В); реостат; люксметр; магазин сопротивлений (Р33); источник света с конденсором; модулятор света (механический прерыватель); монохроматор или набор монохроматических фильтров; осциллограф; источник постоянного тока (30 В); фотоэлементы (кремниевый, селеновый и др.); фотодиоды.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 1) и для фотоэлемента снять:
 - вольт-амперную нагрузочную характеристику при определенном значении освещенности;
 - световые характеристики в режиме короткого замыкания и при различных значениях сопротивления нагрузки;
 - частотные характеристики при определенном значении освещенности и различных значениях сопротивления нагрузки.
2. Построить графики снятых характеристик:
 - 1) $I_n = f(\varphi_n)_{E=const}$;
 - 2) $I_n = f(E)_{R_n=const}$;
 - 3) $I_n = f(\nu_M)_{R_n, E=const}$.
3. Определить по вольт-амперной характеристике фотоэлемента фото-э.д.с. и ток короткого замыкания.
4. Для снятия характеристик фотодиода использовать схему, представленную на рис.2.
5. Снять спектральные характеристики для исследуемого фотодиода и фотоэлемента, определите спектральную чувствительность фотодиода и фотоэлемента.
6. Пронаблюдать кривые релаксации фототока при освещении фотоэлемента и фотодиода прямоугольными световыми импульсами. Оценить по кривым релаксации фототока постоянную времени τ и t_d (см. рис. 2).
7. Зарисовать кривые релаксации фото-э.д.с. при большом уровне освещения.

Вопросы для самоконтроля

1. Каков механизм образования фото-э.д.с. при освещении $p-n$ -перехода?
2. В чем отличие фотодиодного и фотогальванического режимов работы фотодиода?

3. Что такое инерционность фотодиодов и фотоэлементов?
4. Как зависит величина фототока и фото-э.д.с. от величины светового потока, падающего на фотоэлемент?
5. Какие основные характеристики и параметры фотоэлементов и фотодиодов?

Литература

1. А.Л. Булычев и др. Электронные приборы.– Минск.: «Высшая школа», 1999.
2. С.В.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.–М.: «Высшая школа», 1963.
3. А.Н. Пихтин. Оптическая и квантовая электроника.–М.: «Высшая школа», 2001.
4. Быстров Ю.А. Оптоэлектронные приборы и устройства. – М.: издат. предприятие. РадиоСофт. 2001.

ТЕМА 3. ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

1. Процессы в оптическом волноводе.
2. Различные типы оптических волноводов, их характеристики.
3. Элементы волоконной оптики, ввод-вывод излучения в интегрально-оптических волноводах.
4. Механизмы потерь в световых волокнах.

Знание числовой апертуры необходимо для уменьшения потерь, как в устройствах ввода-вывода излучения, так и приходящихся на механические и сплавные сочленения световодов. Несогласованность параметров, не сочленяемых световодов в целом, может привести к очень существенным потерям в линиях из стандартных многомодовых градиентных световодов. Наиболее сильное влияние на потери оказывает несогласованность числовых апертур.

Для определения числовой апертуры в ступенчатом световоде рассмотрим распространение света в нем (см. рис.1). Свет в та-

ком световоде содержит два типа мод: моду, которая распространяется вдоль оптической оси (луч AA') и группу мод, которая распространяется под углом к оптической оси, многократно отражаясь от границы сердцевина - оболочка (луч BB'). Луч BB' распространяется вдоль волокна путем многократных отражений от границы сердцевина - оболочка и не ослабляется при условии, что угол падения луча на границу раздела θ больше критического угла $\theta_{кр}$. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы угол наклона луча к оптической оси световода $\varphi = \pi/2 - \theta$ был меньше $\varphi_m = \pi/2 - \theta_{кр}$, а угол падения α луча из воздуха (n_0) на торец волокна был меньше определенного угла α_m .

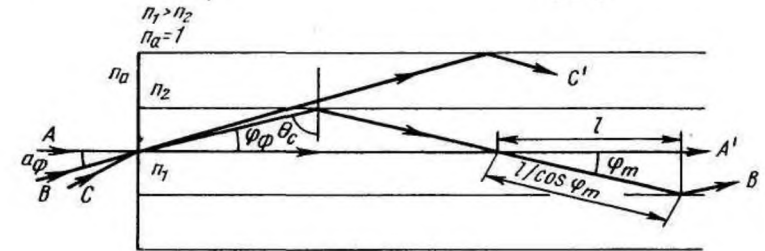


Рис. 1. Распространение света в оптическом волокне

Рассчитаем углы α_m и φ_m , приняв $n_0 = 1$. Согласно закону Снелля,

$$\sin \alpha = n_1 \sin \varphi = n_2 \cos \theta \quad (1)$$

При угле падения, равном критическому,

$$\sin \alpha_0 = n_1 \sin \varphi_0 = n_2 \cos \theta_{кр} \quad (2)$$

$$n_1 \cos \theta_{кр} = n_2 \quad (3)$$

Выразим $\sin \alpha_0$ через показатели преломления сердцевина и оболочки.

Из (3) следует, что

$$\theta_{кр} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1} \quad (4)$$

$$\sin \alpha_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad (6)$$

$$n = \frac{(n_1 + n_2)}{2} \quad (7)$$

Тогда получим:

$$\sin \alpha_0 = (2n\Delta n)^{1/2} \quad (8)$$

С ростом угла α_m возрастает доля светового потока, который распространяется в оптическом волокне за счет полного внутреннего отражения. Величину $n \sin \alpha_0$ ($n \approx 1$) называют числовой апертурой волокна NA:

$$(NA) = \sin \alpha_0 = (2n\Delta n)^{1/2} \quad (9)$$

Таким образом, все лучи, падающие на торец волокна под углом меньше α_m , распространяются в сердцевине световода. Излучение, заключенное внутри конуса с углом при вершине $\alpha = \alpha_0$, представляет собой каналируемые моды. Если $\alpha > \alpha_0$, то луч света CC' не отражается от границы $n_1 n_2$ и вводится в оболочку. Эта часть излучения представляет собой вытекающие или оболочечные моды. Вытекающие моды удерживаются в оболочке, если выполняется условие полного внутреннего отражения на внешней границе оболочки. Если это условие не выполняется, то лучи выходят из оболочки — излучаемые моды. При больших длинах светопередачи вытекающие лучи поглощаются в оболочке (она менее прозрачна, чем сердцевина) и в процессе светопередачи по волокну участвуют только внутриапертурные направляемые лучи.

Используя (9) и рис.2, возможно получить выражение для допустимой числовой апертуры изогнутого световода

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 (1 + D/2R)^2}, \quad (10)$$

где D — диаметр световедущей жилы; R — радиус изгиба световода.

Из сравнения выражений (9) и (10) следует, что числовая апертура для изогнутого световода меньше, чем для прямого. Решающей для воздействия на числовую апертуру путем изгиба является величина D/R . Ее значение существенно меньше 1, так как $R \gg D$ при соблюдении минимальных радиусов изгиба световода, и уменьшение числовой апертуры составляет несколько процентов.

Для измерения числовой апертуры световода применяется метод «трех колец», который базируется на световом явлении «трех колец». Наблюдения светового торца световода показали, что при падении оптического пучка на его входной торец под углами, меньшими апертурного, торец сердцевинки имеет яркость значительно большую, чем торец оболочки. При углах падения пучка, превосходящих апертурный, большую яркость имеет торец оболочки.

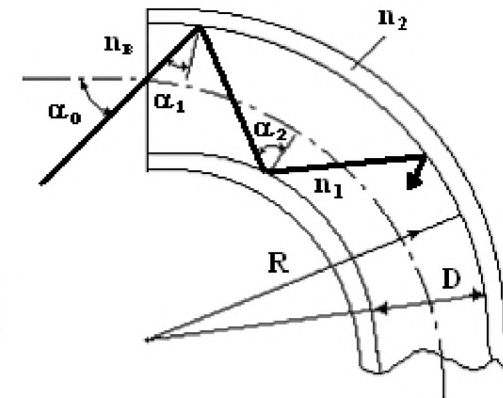


Рис.2. Распространение света в изогнутом световоде

Наибольший интерес представляет случай при подаче направленного пучка лучей на входной торец световода под углом падения, равным апертурному углу (α_0). При этом торец сердцевинки и оболочки имеют одинаковую яркость, но граница их раздела представляет собой ярко светящееся кольцо. Причиной этого

является распространение граничного луча вдоль границы раздела сердцевины и оболочки.

Согласно Выражению (1) числовая апертура находится в прямой зависимости от апертурного угла. Эта зависимость и положена в основу метода «трех колец» для измерения числовой апертуры волоконных световодов.

Оптическая схема для измерения числовой апертуры этим методом приведена на рис.3.

Луч лазера 1 пройдя телескопическую систему 2 с помощью объектива 3 фокусируется на входной торец световода 4, закрепленном на поворотном столе. Стол вращается таким образом, что его ось вращения проходит через центр входного торца световода. Выходной торец рассматривается через микроскоп или на экране 5. Четкое кольцо на границе световедущая жила – оболочка наблюдается при определенном угле падения оптического луча. В этой точке световедущая жила становится темной. Далее стол вращается в противоположном направлении, и снова под определенным углом падения наблюдается аналогичное яркое кольцо на границе раздела. Половина суммы этих двух показаний составляет угол числовой апертуры.

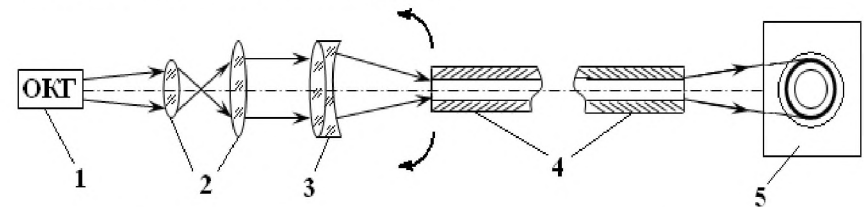


Рис.3. Оптическая схема для измерения числовой апертуры световода

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: изучение метода «трех колец» и измерение числовой апертуры световода.

Приборы и принадлежности: He-Ne – лазер, телескопическая и фокусирующая системы, световод, микроскоп.

Порядок выполнения работы.

1. Собрать схему для измерения числовой апертуры представленную на рис.3.
2. С помощью фокусирующей системы направить излучение лазера в центр световодного торца.
3. Методом «трех колец» определить угол числовой апертуры. Измерения провести не менее пяти раз.
4. Аналогичные измерения провести для случая изогнутого световода.

Вопросы для самоконтроля

1. Как распространяется свет в волоконных световодах?.
2. Какие оптические параметры и характеристики волоконных световодов?
3. Какие существуют методы измерения числовой апертуры световодов?

Литература.

1. Элион Г., Элион Х. Волоконная оптика в системах связи; Перевод с английского / Под ред. Е.М. Дианова, - М.: Мир, 1981.
2. Хансперджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология; ; Перевод с английского / Под ред. В.А. Сигутова – М.: Мир, 1985.
3. Свечников Т.С. Элементы интегральной оптики, - М.: Радио и связь, 1987.
4. Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г. Световодные датчики. – М.: «Машиностроение», 1990

ТЕМА 4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1. Фотопроводимость.
2. Основные величины и соотношения, характеризующие фотопроводимость.
3. Время жизни неравновесных носителей заряда и релаксация фотопроводимости.
4. Фототок, коэффициент усиления по фототоку.

Для измерения биполярной подвижности носителей заряда на поверхность образца проектируется узкая поперечная полоска лазерного излучения (освещение постоянное). В её окрестности устанавливается стационарное распределение неравновесных электронов и дырок. На некотором расстоянии от лазерного пучка к образцу прижимается коллекторный зонд, соединенный с входом вертикального отклонения осциллографа (рис.1).

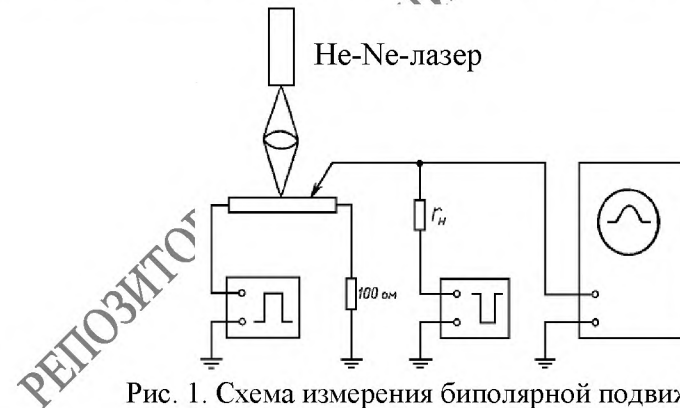


Рис. 1. Схема измерения биполярной подвижности (образец n -типа).

На образец подается импульс тянущего напряжения такой полярности, чтобы область избыточной концентрации совершала дрейфовое движение по направлению к коллекторному контакту. Одновременно на коллектор подается импульс запирающего напряжения такой величины, чтобы скомпенсировать падение

напряжения на участке образца между коллектором и заземленным концом, обусловленное тянущим полем. Эта компенсация нарушается, когда в процессе дрейфа в окрестности коллекторного контакта появляются неравновесные носители заряда. Время дрейфа неравновесных носителей от освещаемой области до коллектора определяется по участку осциллограммы от начала тянущего импульса до вершины всплеска напряжения, вызванного нарушением компенсации. Измерив времена дрейфа для двух расстояний между световой полоской и коллектором, легко определить дрейфовую скорость перемещения области скопления неравновесных пар:

$$V_{др} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Отрезок $x_2 - x_1$ измеряется при помощи индикатора перемещений, а промежуток времени $t_2 - t_1$ - по меткам времени на экране осциллографа.

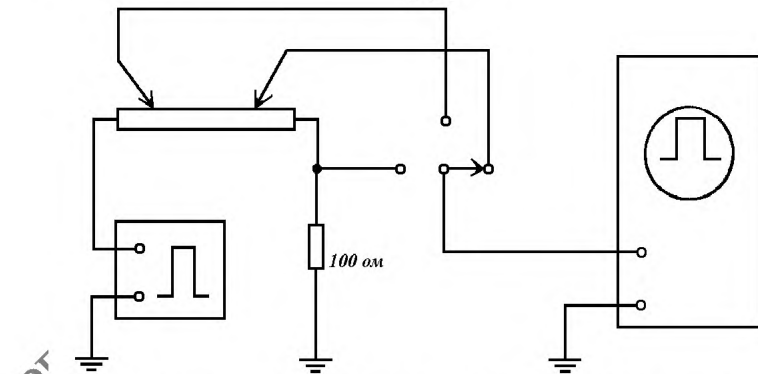


Рис. 2. Схема измерений поля и удельного сопротивления

Чтобы найти биполярную подвижность нужно помимо $V_{др}$ измерить напряженность E тянущего поля.

$$\mu = \frac{V_{др}}{E}, \quad (2)$$

Для этого к образцу прижимают ещё один точечный зонд и измеряют падение напряжения $U_2 - U_1$ на участке образца между зондами. В этом случае внешнее напряжение на зонды не подается, и они поочередно подключаются к входу вертикального отклонения осциллографа (рис. 2), предварительно откалиброванного по напряжению. Если l – расстояние между зондами, то напряженность поля

$$E = \frac{U_2 - U_1}{l} \quad (3)$$

Таким же образом измеряют напряжение U на сопротивлении 100 ом, соединённом последовательно с образцом. Отсюда узнают силу тока $I = \frac{U}{100}$, текущего через образец, и его удельное сопротивление

$$\rho = \frac{U_2 - U_1}{l} \cdot \frac{bd}{I}, \quad (4)$$

где b и d – заранее измеренные ширина и толщина образца.

Измерение l проводят следующим образом. Отключают генератор тянущего поля, а на один из зондов подают постоянное запирающее напряжение (рис. 3). Включают мотор прерывателя лазерного пучка, так что генерация неравновесных пар производится теперь периодически (с периодом, много большим времени жизни). Положение коллекторного контакта на образце находят при помощи индикатора перемещений по максимуму переменного сигнала на экране осциллографа. Переключив напряжение смещения на другой коллектор, тем же способом определяют местоположение второго коллекторного контакта, после чего вычитанием находят l .

Та же самая схема измерений (рис. 3) служит для определения диффузионной длины L . Для этого измеряют амплитуду U импульсов напряжения на коллекторе (пропорциональных концентрации неравновесных пар δp) при различных положениях x по-

лоски лазерного излучения на образце и строят график зависимости $\ln U$ от x . Величина углового коэффициента прямой, проведённой через экспериментальные точки, $\left| \frac{\Delta x}{\Delta \ln U} \right| = L$.

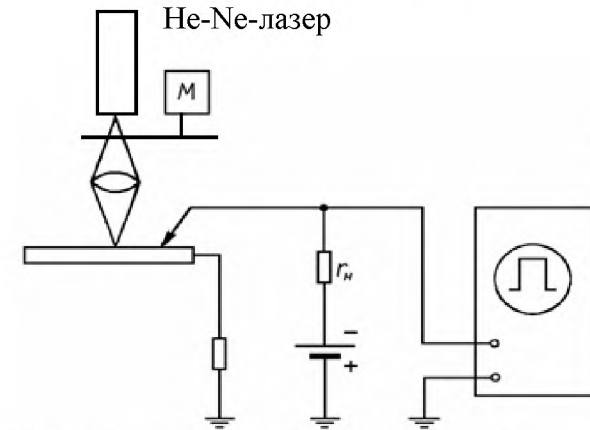


Рис. 3. Схема измерений диффузионной длины (образец n -типа).

Таким образом непосредственно определяется биполярная подвижность μ , диффузионная длина L неравновесных носителей заряда и удельное сопротивление ρ образца. Если удельное сопротивление оказывается хотя бы в несколько раз меньше собственного (равного для Ge 50 ом на см при комнатной температуре), то это значит, что образец обладает примесной проводимостью n - или p -типа. В этом случае биполярная подвижность (5)

$$\mu = \frac{\frac{n}{\mu_p} - \frac{p}{\mu_n}}{\frac{n}{\mu_p} + \frac{p}{\mu_n}} \quad (5)$$

практически совпадает по величине с подвижностью носителей заряда, являющихся неосновными (т. е. дырок в электронном образце и электронов в дырочном). То же самое относится и к коэффициенту диффузии. Вычислив его по соотношению Эйнштейна (6), которое определяет связь коэффициентов диффузии и

подвижности

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана;

q – абсолютная величина заряда электрона;

D – коэффициент диффузии, характеризующий градиент концентрации;

μ – подвижность зарядов во внешнем поле.

можно из (7) найти время жизни неравновесных пар (также совпадающее со временем жизни неосновных носителей заряда).

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (7)$$

Измерительный стенд состоит из генератора прямоугольных импульсов напряжения, измерительного стенда и осциллографа.

Генератор прямоугольных импульсов имеет два выхода для импульсов противоположной полярности, вырабатываемых синхронно. Один импульс служит для создания электрического поля в полупроводниковом образце, а другой – для подачи запирающего напряжения на коллектор. Длительность импульсов может устанавливаться в пределах от 10 до 100 мксек, частота повторения в пределах от 40 до 200 Гц. Амплитуды импульсов разных полярностей регулируются независимо и могут изменяться от 0 до 20 в. Импульсы напряжения, вырабатываемые генератором, передаются по коаксиальным кабелям на измерительный стенд.

Измерительный стенд включает в себя держатель образца, укрепленный на манипуляторе, индикатор перемещения образца, пульт переключения режима работы, оптическую систему с прерывателем лазерного пучка, трансформатор питания мотора прерывателя с укрепленными на нем выключателями.

Образец вытянутой прямоугольной формы укрепляется на держателе между контактами, к которым подводится напряжение для создания тянущего поля. К верхней поверхности образца прижимаются два металлических острия, служащие зондами при измерениях удельного сопротивления, длины диффузии и биполярной подвижности. Держатель вместе с образцом и зондами

может перемещаться при помощи манипулятора. Величина сдвига в продольном направлении измеряется с точностью до 0,01 мм индикатором перемещений.

Манипулятор с держателем образца укреплен на пульте переключателей (схема приведена на рис. 4). Левый переключатель «смещение на коллектор» устанавливается в одном из четырех положений:

- 1) «Выключено»;
- 2) «Импульсное смещение»;
- 3) «Постоянное отрицательное смещение»;
- 4) «Постоянное положительное смещение».

Левый переключатель имеет три положения и служит для подключения выходного гнезда к левому или правому зонду или к сопротивлению 100 Ом, включенному последовательно с образцом. Выходное гнездо соединяется коаксиальным кабелем с входом вертикального отклонения осциллографа. Коаксиальные гнезда входа и выхода находятся на левой стенке пульта. На передней панели пульта кроме переключателей имеется ещё рукоятка переменного нагрузочного сопротивления коллектора.

Оптическая система состоит из осветителя с конденсором, фокусирующей линзы, дискового прерывателя лазерного пучка, вращаемого асинхронным мотором. Изображение фокусируется линзой на поверхность образца.

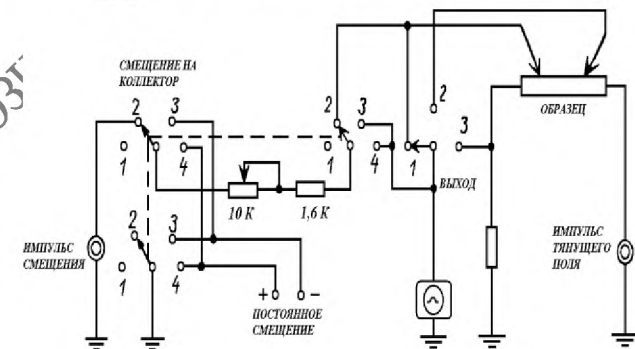


Рис. 4. Электрическая схема пульта переключателей

Электронный осциллограф используется для наблюдения и измерения сигналов с зондов и включаемого последовательно с образцом сопротивления $100\ \text{ом}$. Развертка осциллографа запускается импульсом синхронизации, поступающим по коаксиальному кабелю от генератора прямоугольных импульсов (при измерениях подвижности и удельного сопротивления), или измеряемым сигналом (при измерении диффузионной длины).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: определение типа проводимости и измерение диффузионной длины, биполярной подвижности и времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых образцах.

Приборы и принадлежности: осциллограф; образец кремния; коммутатор с переключателями режима работы; генератор синхронных прямоугольных импульсов противоположных полярностей; фокусирующая линза; He-Ne-лазер; вращающийся прерыватель света; регулируемый источник напряжения для прерывателя; нерегулируемый источник напряжения.

Порядок выполнения работы.

1. Перед включением измерительного стенда следует измерить поперечные размеры образца, укрепить его в держателе и установить зонды на расстоянии $7\text{--}8\ \text{мм}$ друг от друга. Дальнейшие действия выполняются в следующем порядке:
2. Поставить переключатель «Смещение на коллектор» на коммутаторе в положение «Имп.», а переключатель «Выход» - в положение «Лев.» (рис. 1 и 4).
3. Установить частоту повторения импульсов $100\ \text{Гц}$, длительность импульсов $20\ \text{мксек}$. Поставить переключатель рода работы осциллографа в положение «Ждущая развертка», переключатель «Синхронизация» - в положение «Внешняя», а переключатель «Длительность развертки» - $20\ \text{мксек}$.

4. Включить генератор импульсов и осциллограф.
5. Поворотом ручек на панели генератора импульсов установить наибольшую амплитуду импульса тянущего поля и наименьшую – импульса смещения на коллекторе. Знаки этих импульсных напряжений должны быть противоположны.
6. Наблюдая на экране осциллографа за импульсом, снимаемым с левого коллектора, скомпенсировать его, повышая напряжение смещения.
7. Включить блок питания лазера, повернуть диск прерывателя так, чтобы излучение падала на образец, сфокусировать изображение оптической щели на поверхности образца. При помощи манипулятора установить держатель с образцом в такое положение, чтобы полоска лазерного излучения находилась между зондами на расстоянии 5-6 мм от левого зонда.
8. Установить усиление канала вертикального отклонения осциллографа так, чтобы отчетливо наблюдался сигнал (в виде горба или впадины), связанный с появлением неравновесных носителей в окрестности коллекторного контакта. При увеличении усиления улучшать по мере надобности компенсацию импульсов поля и смещения. Если сигнал неравновесных носителей не наблюдается, изменить полярность импульсов тянущего поля и смещения на коллекторе на противоположные и повторить действия в пп. 5, 6 и 8. По направлению тянущего поля и направлению дрейфа неравновесных носителей определить тип проводимости образца (электронный или дырочный).
9. Поставить ручку «Калибровка длительности» на панели осциллографа в положение «1 мксек». Используя метки времени на экране осциллографа и показания индикатора перемещений, снять зависимость времени дрейфа носителей от положения освещенной области. Временной интервал между экспериментальными точками выбрать таким, чтобы можно было снять 10-12 точек. Построить соответствующий график и определить из него $V_{др}$.
10. Уменьшить усиление канала вертикального отклонения осциллографа, включить метки времени, включить смещение на коллекторе и освещение образца. Стенд подготовлен для измере-

ния напряжения (U_1) на левом зонде, обусловленного импульсом тянущего поля (рис. 2).

11. Наблюдая импульсный сигнал на экране осциллографа, измерить потенциал U_1 , снимаемый левым зондом. Калибровку напряжения провести по описанию осциллографа.

12. Переставляя переключатель выхода на панели коммутатора поочередно в положения «Прав.» и «100 ом», измерить потенциал U_2 , снимаемый правым зондом, и падение напряжения на последовательно соединенном с образцом сопротивлении 100 ом. Вычислить $U_2 - U_1$ и ток I через образец.

13. Уменьшив амплитуду импульса тянущего поля приблизительно в двое, повторить полностью измерения.

14. Выключить генератор импульсов, поставив переключатель «Выход» на панели коммутатора в положение «Лев.», а переключатель «Смещение на коллектор» в положение «Пост. +» или «Пост. -» в зависимости от типа проводимости образца. Поставить переключатель синхронизации осциллографа в положение «Внутренняя», а переключатель «Длительность развертки» в положение «3 тыс. мксек».

15. Включить лазер и мотор прерывателя излучения. Схема подготовлена для измерения диффузионной длины ζ (рис.3).

16. Перемещая держатель с образцом так, чтобы освещаемая область приближалась к левому коллектору, наблюдать импульсы напряжения на коллекторе, обусловленные неравновесными носителями. Снять зависимость амплитуды U этого напряжения (в относительных единицах) от положения x образца относительно полосы лазерного излучения, отсчитываемого по индикатору перемещений. По наибольшей амплитуде импульсов определить положение x_1 левого зонда.

17. Построить график зависимости $\ln U$ от x и определить диффузионную длину L .

18. Поставив переключатель выхода на коммутаторе в положение «Прав.», определить тем же способом положение правого зонда и найти расстояние между обоими зондами.

19. Вычислить для обоих значений тянущего поля его величину E , биполярную подвижность μ и удельное сопротивление ρ образца (соответственно формулы (3), (2), (4)).
20. По величине ρ сделать заключение о том, обладает ли образец явно выраженной примесной проводимостью, или его проводимость близка к собственной.
21. Если проводимость образца примесная, рассчитать по соотношению Эйнштейна (6) коэффициент диффузии D_n или D_p неосновных носителей. Вычислить время жизни τ носителей по формуле (7).

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется диффузионной длиной неравновесных носителей заряда?
2. Что такое время дрейфа неравновесных носителей заряда?
3. Что такое биполярная подвижность носителей заряда и от чего она зависит?
4. Какие существуют методы определения диффузионной длины неравновесных носителей заряда и их подвижности?

Литература

1. С.В.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: «Высшая школа», 1963.
2. Л.П.Павлов. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. – М.: «Высшая школа», 1975.
3. В.В.Остробородова, В.Д.Егоров. Спецпрактикум по физике полупроводников. Часть I. – Изд. Московского университета, 1974

ТЕМА 5. МОДУЛЯТОРЫ И ДЕФЛЕКТОРЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Принципы работы оптических модуляторов и дефлекторов.
2. Их характеристики и параметры.
3. Применение дефлекторов и модуляторов оптического излучения.

Дифракция света на ультразвуковых волнах была впервые предсказана Бриллюэном и независимо от него Мандельштамом в 1921 г., а экспериментально обнаружена спустя несколько лет Дебаем и Сирсом и Люка и Бикаром. Качественно это явление можно объяснить следующим образом. Ультразвуковая волна, распространяясь в твердом теле или жидкости, создает локальные сжатия и разрежения среды. Вследствие эффекта фотоупругости из-за механических напряжений возникают изменения диэлектрической проницаемости, а следовательно, изменения показателя преломления среды. Таким образом, в среде образуются периодические слои с отличающимся показателем преломления. Эти слои движутся со скоростью звука и следуют друг за другом на расстоянии половины длины звуковой волны. При прохождении света через такую слоистую структуру возникает дифракция (рис.1).

Различают два вида (режима) дифракции, отличающиеся разными дифракционными спектрами: Рамана—Ната и Брэгга. Дифракция Рамана—Ната наблюдается на низких звуковых частотах и при не слишком большой длине взаимодействия (глубине акустического поля). При нормальном падении света, т. е. параллельно волновому фронту звуковой волны, дифракционный спектр Рамана—Ната представляет расположенные симметрично по обе стороны от прошедшего пучка равноотстоящие друг от друга дифракционные максимумы. При наклонном падении света интенсивность максимумов, возникающих по обе стороны от прошедшего пучка, уменьшается, но их угловые направления на них остаются неизменными. Угловое направление дифракционных максимумов (рис. 1) относительно нулевого (соответствующего

щего прямо прошедшему свету) определяется формулой $\sin \theta_m = m\lambda/L$, $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, где θ_m —угловое направление на дифракционный максимум m -го порядка; λ —длина световой волны в веществе; L —длина звуковой волны. Знак плюс соответствует максимумам, которые расположены с той стороны, куда отражается свет от фронтов звуковой волны.

Частота света в m -м максимуме сдвинута относительно частоты падающего света на величину, пропорциональную акустической частоте Ω , и равна $\omega + m\Omega$.

О дифракции Брэгга говорят в том случае, когда дифракционный спектр состоит из двух максимумов, соответствующих значениям $m=0$ и $m=1$ (рис. 2). Дифракционные максимумы минус первого и высших порядков отсутствуют. Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющим условию Брэгга

$$\sin \theta_m = \lambda/2L \quad (1)$$

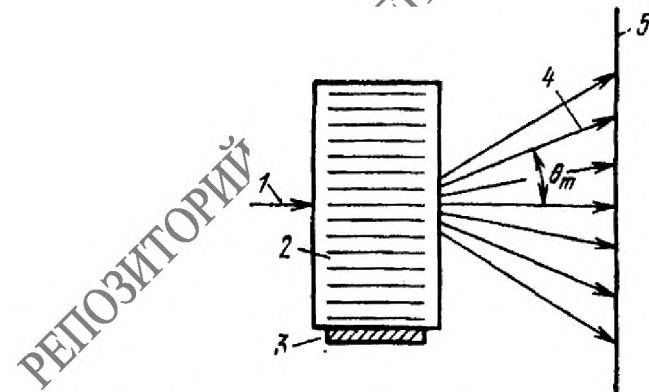


Рис. 1. Ход лучей для дифракции Рамана—Ната при нормальном падении света

1-падающий свет; 2-звуковая волна; 3-пьезопреобразователь; 4-дифракционный максимум m -го порядка; 5-экран

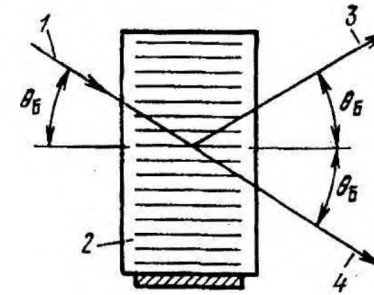


Рис. 2. Ход лучей при дифракции Брэгга:

1– падающий свет; 2–звуковая волна; 3 – дифрагированный свет; 4– прошедший свет

Угол θ_B , определяемый выражением (1), называется углом Брэгга. Дифракция Брэгга имеет место на высоких частотах при большой длине взаимодействия света с акустической волной.

Физическая интерпретация этих двух различных типов дифракции состоит в следующем. При неизменной длине волны света на низких звуковых частотах при малой длине взаимодействия (длине акустического столба) направление распространения падающего света внутри области взаимодействия остается прямолинейным и оптическая неоднородность среды, связанная с изменением показателя преломления, влияет только на фазу света, прошедшего через акустический столб. Для света роль акустической волны в этом случае сводится к созданию движущейся со скоростью звука фазовой решетки с периодом, равным периоду звуковой волны. Такая ситуация соответствует дифракции Рамана—Ната. Дифракция света в режиме Рамана—Ната происходит по законам дифракции на обычной фазовой решетке, и именно этим объясняется наличие симметричных эквидистантно расположенных дифракционных максимумов. Частоты света в дифракционных максимумах сдвинуты согласно эффекту Доплера вследствие движения фазовой решетки.

При увеличении акустической частоты или длины взаимодействия направление распространения падающего света внутри акустического

столба уже нельзя считать прямолинейным, а возникшую периодическую структуру — только фазовой решеткой. Свет испытывает как фазовые, так и амплитудные возмущения, и происходит постепенный переход от дифракции на фазовой решетке (дифракции Рамана—Ната) к рассеянию на объемной периодической структуре (дифракции Брэгга). В переходной области между режимами Рамана—Ната и Брэгга при падении света под углом Брэгга помимо первого максимума наблюдаются дифракционные максимумы высших порядков. Угловые направления этих максимумов относительно падающего света сохраняются такими же, как и при дифракции Рамана—Ната, но распределение интенсивностей становится асимметричным. Наибольшую интенсивность имеет брэгговский (первый) максимум. Наконец, на высоких частотах и при значительной глубине звукового поля акустооптическое взаимодействие целиком приобретает объемный характер, и происходит селективное отражение света под углом Брэгга от движущейся периодической структуры, созданной ультразвуковой волной. Дифракция света в режиме Брэгга аналогична хорошо известному явлению дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке в твердом теле.

В отклоняющих устройствах — дефлекторах сканирование лазерного луча осуществляется путем изменения акустической частоты. Для наблюдения дифракции света на ультразвуковых волнах может быть использована схема, представленная на рисунке 3. В данной схеме применяется дефлектор, использующий изотропную брэгговскую дифракцию.

Наиболее важными параметрами дефлекторов являются: закон сканирования, амплитуда угла отклонения, разрешающая способность, искажения фронта световой волны, частота сканирования, диапазон частот сканирования, полоса пропускания, быстродействие, равномерность движения луча, допустимая линейная апертура сканируемого светового пучка, допустимая угловая расходимость пучка, спектральный оптический диапазон работы, оптические потери, электрическое напряжение и ток, чувствительность к отклонению.

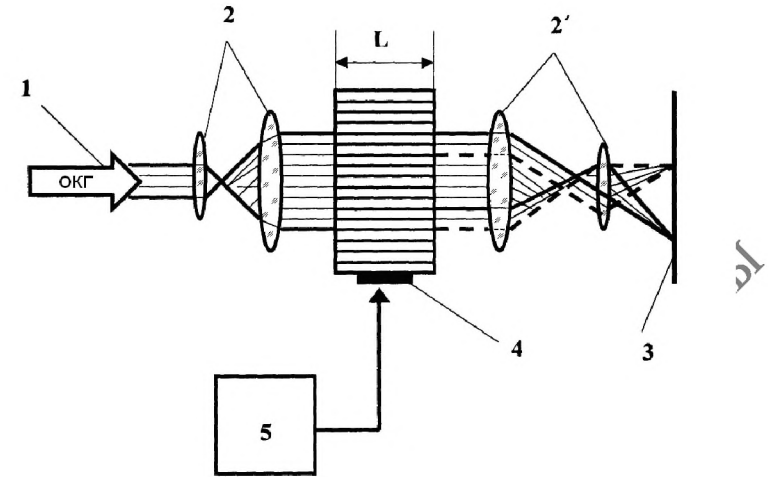


Рис. 3. Схема установки для исследования акустооптического брэгговского дефлектора:

1 – ОКГ; 2,2' – телескопическая система; 3 – экран; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – генератор.

Закон сканирования определяет характер движения луча. Сканирование может быть линейным, синусоидальным, пилообразным или каким-либо другим.

Амплитуда угла отклонения $\Delta\alpha$ характеризует максимальное угловое перемещение луча. Она выражается в радианах или градусах $\Delta\alpha = 2\gamma_{ак}$

Разрешающая способность оценивается числом элементов разрешения N , определяющим число различных направлений луча, укладывающихся в пределах угла отклонения $\Delta\alpha$. Для оценки разрешающей способности широко применяется критерий Релея. Два изображения светящихся точек считаются лежащими на пределе разрешения, если расстояние между центрами кривых рассеяния равно такой величине, при которой центральный максимум одной из них совпадает с первым минимумом второй. В этом случае угловая расходимость светового пучка равна

$$\gamma = \varepsilon(\lambda/nD) \quad (2)$$

где λ — длина волны излучения; D - ширина пучка; n - показатель преломления среды; ε коэффициент, зависящий от формы пучка, $\varepsilon = 1,22$ для пучка круглого сечения с равномерным распределением интенсивности.

Разрешающая способность дефлектора при одномерном сканировании и отсутствии вносимых дефлектором искажений в апертуру светового пучка выражается соотношением

$$N = \Delta\alpha/\gamma. \quad (3)$$

Подставляя выражение (2) в (3), получаем

$$N = \Delta\alpha D n / \varepsilon \lambda \quad (4)$$

Разрешающая способность N —более важный параметр, чем угол отклонения, так, $\Delta\alpha$ может быть увеличен или уменьшен применением соответствующей оптической системы, а N остается при этом неизменной или в худшем случае уменьшается.

Частота акустической волны определяется по формуле

$$f_{ак} = 2nV_{ак} \sin\theta_{-1} / \lambda \quad (5)$$

где θ_{-1} - угол дифракции минус первого порядка.

Частота сканирования f [Гц] определяет число периодов колебаний луча при его пространственном перемещении за 1 с. Одни дефлекторы работают только на одной фиксированной частоте, а другие—в диапазоне частот f_1 — f_2 .

Полоса пропускания Δf характеризует качество дефлектора и оценивается произведением частоты сканирования на разрешающую способность:

$$\Delta f = Nf = \Delta\alpha f / \varepsilon \lambda \quad (6)$$

Быстродействие дефлектора t_d [с] определяет скорость изменения пространственного положения луча при его переходе с одного элемента разрешения на соседний. Для непрерывных дефлекторов

$$t_d = 1/\Delta f = 1/Nf. \quad (7)$$

Полоса рабочих частот дефлектора определяется несколькими физическими причинами. Наиболее важная связана с конечной шириной углового распределения звукового поля. На полосу

дефлектора влияет не только распределение звукового поля, которое определяет его собственную частотную характеристику, но и частотная характеристика системы возбуждения звука.

Под частотной характеристикой дефлектора будем понимать зависимость интенсивности отклоненного света от частоты при неизменном угле падения.

Оптические потери в дефлекторе определяются коэффициентом пропускания τ потока излучения:

$$\tau = \Phi_{\text{вых}} / \Phi_{\text{вх}} = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} \quad (8)$$

где $\Phi_{\text{вых}}$ и $\Phi_{\text{вх}}$ — потоки излучения, выходящие из дефлектора и входящие в него; $I_{\text{вых}}$ и $I_{\text{вх}}$ — плотности потоков излучения выходящего из дефлектора и входящего в него.

Для более полного описания дефлекторов (с точки зрения определения пригодности применения в той или иной аппаратуре и обоснования требований к электрическому блоку управления, а также возможности проведения сравнительной оценки устройств отклонения) для каждого дефлектора необходимо определять частотную, амплитудную и вольт-амперную характеристики.

Частотная характеристика выражает зависимость числа элементов разрешения или угла отклонения от частоты управляющего электрического напряжения: $N=f(f)$, $\Delta\alpha=f(f)$. На основании этой характеристики может быть выбрана рабочая частота f_c сканирования луча или же рабочий диапазон частот f_1 — f_2 .

Амплитудная характеристика дефлектора определяет зависимость амплитуды угла отклонения луча или числа элементов разрешения от потребляемой электрической мощности $P_{\text{эл}}$ подводимого электрического напряжения и ИЛИ потребляемого электрического тока I :

$$N=f(P_{\text{эл}}); \Delta\alpha=f(P_{\text{эл}}); N=f(U); \Delta\alpha=f(U);$$

$$N=f(I); \Delta\alpha=f(I).$$

При частотном управлении она характеризует зависимость амплитуды угла отклонения или числа элементов разрешения от частоты воздействующего сигнала.

Вольт-амперная характеристика выражает зависимость величины потребляемого дефлектором электрического тока от

прикладываемого электрического напряжения: $I=f(U)$. Эта характеристика позволяет определить входное сопротивление дефлектора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: изучение условий возникновения и характера дифракции света на ультразвуке, определение основных параметров акустооптического дефлектора.

Приборы и принадлежности: He-Ne-лазер; акустооптический дефлектор; генератор; частотомер ЧЗ-45; вольтметр В7-15.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать следующие параметры:
 - угол падения луча θ_B для Брэгговской дифракции (1);
 - угол дифракции минус первого порядка световой волны $\theta_{-1-п}$ (формула (5));
 - угловую расходимость акустического пучка $\gamma_{ак} = \lambda/L$;
 - угол отклонения $\Delta\alpha = 2\gamma_{ак}$;
 - разрешающую способность N (формула (4)).

При выполнении расчетного задания считать, что длина волны излучения $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, скорость распространения акустических волн $V_{ак} = 5700 \text{ м/с}$ (для кварца), частота акустической волны $f_{ак} = 50 \text{ МГц}$ ширина акустического пучка $L = 380 \text{ мм}$, ширина светового пучка $D = 2 \text{ мм}$, коэффициент, зависящий от формы пучка $\epsilon = 1,22$ (для пучка круглого сечения с равномерным распределением интенсивности), показатель преломления $n = 1,54$ (для кварца).

2. Собрать оптическую схему (рис.3.) и получить дифракцию Брэгга излучения He-Ne-лазера на ультразвуке.
3. Экспериментально проверить полученные в п.1. расчеты.
4. Определить полосу пропускания Δf по формуле (6).
5. Зная полосу пропускания Δf рассчитать быстродействие де-

- флектора t_d по формуле (7).
6. Определить потоки излучения, выходящие из дефлектора и входящие в дефлектор. Рассчитать оптические потери в дефлекторе.
 7. Определить частотную характеристику $N=f(f)$, $\Delta\alpha=f(f)$. Выбрать рабочую частоту f сканирования луча.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое дифракция света на ультразвуковых волнах?
2. В чем заключается дифракция Брэгга в изотропных средах?
3. Что такое акустооптические дефлекторы, их характеристики и параметры?
4. Где применяются акустооптические дефлекторы?

Литература

1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: "Советское радио", 1978г.
2. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. — М.: "Советское радио", 1977г.
3. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. -М.: "Наука", 1970г.
4. Балацкий В.И., Парыгин В.Н. Физические основы акустооптики. — М. "Радио и связь", 1985г.
5. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. — М.: "Высшая школа", 1983г.

ТЕМА 6. ОПТРОНЫ

1. Схемы оптронов и их элементы.
2. Параметры, характеризующие работу оптронов.
3. Резисторные, диодные, транзисторные и тиристорные оптопары.
4. Оптоэлектронные микросхемы.

Оптронами называются такие оптоэлектронные приборы, в которых имеются 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.

В резисторной оптопаре в качестве фотоприемника используется полупроводниковый резистор, сопротивление которого уменьшается при воздействии видимых световых и невидимых инфракрасных лучей. Уменьшение сопротивления фоторезистора происходит за счет генерации светом пар свободных носителей заряда – электронов и дырок, увеличивающих электропроводность полупроводника.

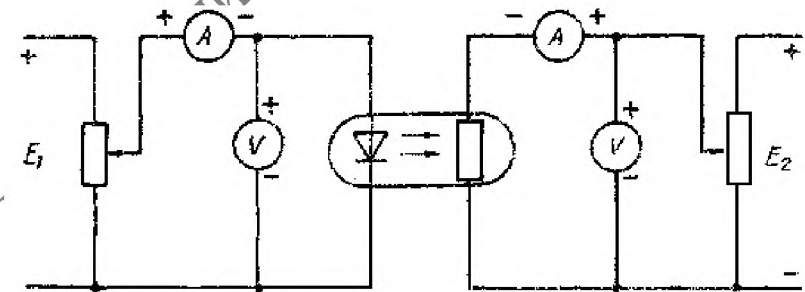


Рис. 1. Схема измерения характеристик резисторного оптрона.

К видимому свету наиболее чувствительны фоторезисторы, токопроводящие элементы которых представляют собой таблетки из селенида кадмия или сернистого кадмия. Тонкие слои сернистого или селенистого свинца, нанесенные на стеклянную или ситаловую подложки, более чувствительны к инфракрасному излучению. В резисторной оптопаре в качестве излучателей могут применяться сверхминиатюрные лампочки накаливания, но чаще всего – инжекционные излучательные диоды или инфракрасные диоды. Общим требованием к оптронам является согласованность излучателя и приемника по спектральным характеристикам. Фоторезистор и излучатель объединены внутри корпуса оптрона оптически прозрачной средой (клеем) с большим сопротивлением изоляции. Поэтому цепь излучателя надежно изолирована от входной цепи оптрона-фотоприемника.

Параметры оптопары зависят от температуры. Повышение температуры фоторезистора приводит к уменьшению его светового сопротивления, снижению фототока и в то же время повышает его темновой ток, снижая темновое сопротивление. Характеристики резисторной оптопары показаны на рис. 2 — 4.

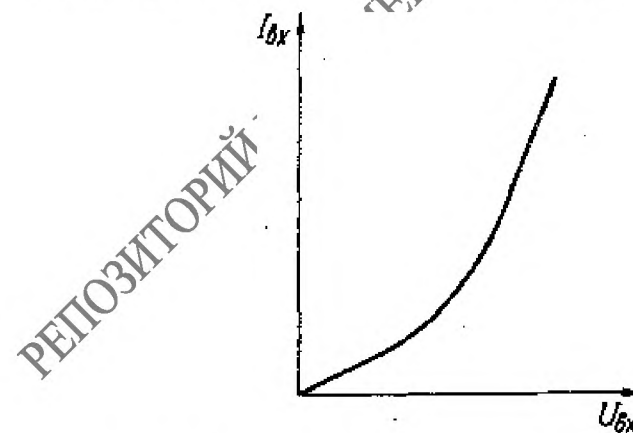


Рис. 2. Входная характеристика резисторного оптрона

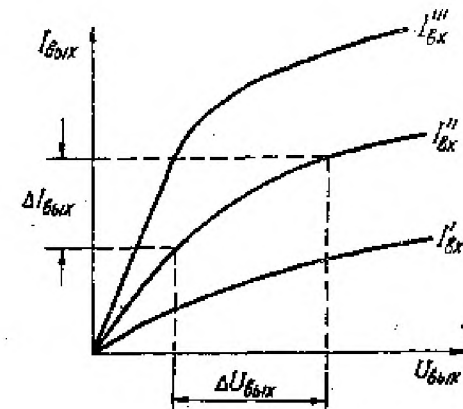


Рис.3. Выходная характеристика резисторного оптрона

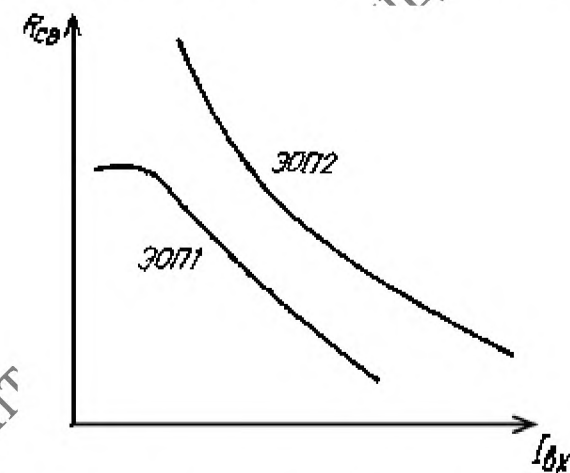


Рис.4. Зависимость светового сопротивления от входного тока для резисторных оптронов ЭОП1, ЭОП2

Для определения зависимости светового сопротивления от входного тока необходимо иметь семейство статических выходных характеристик:

$$I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}}) \text{ при } I_{\text{вх}} = \text{const}$$

с помощью которых нетрудно определить для каждого значения входного тока световое сопротивление прибора (см. рис. 3):

$$R_{ce} = \left. \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} \right|_{I_{вых} = const}$$

и построить зависимость: $R_{ce} = f(I_{вх})$.

В диодной оптопаре в качестве фотоприемника используется фотодиод на основе кремния, а в качестве излучателя – инфракрасный излучающий диод.

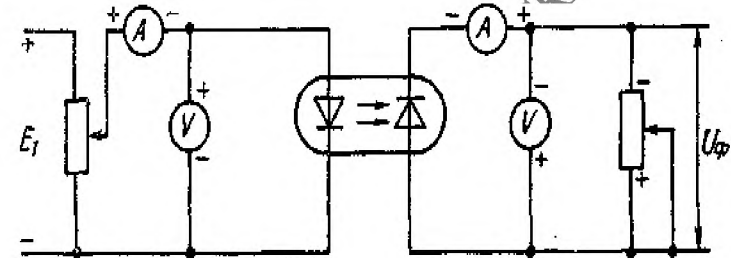


Рис. 5. Схема измерения характеристик диодного оптрона в фотогенераторном режиме.

Максимум спектральной характеристики излучения диода приходится на длину волны около 1 мкм. Излучение с такой длиной волны вызывает генерацию электронно-дырочных пар носителей заряда в полупроводнике. Электроны и дырки экстрагируются электрическим полем контактной разности потенциалов перехода фотодиода и заряжают *p*-область положительно, а *n*-область отрицательно. На выводах фотодиода появляется фото-ЭДС. Такой режим работы фотодиода называется *фотогенераторным*, или *фотовентильным*, коэффициент передачи тока $K_I = I_{вых} / I_{вх}$ в диодных оптронах составляет единицы процентов.

В общем случае выходной ток фотодиода записывается:

$$I_{\text{вых}} = I_0 \left(\exp \frac{qU_{\text{вых}}}{kT} - 1 \right) - I_{\phi}$$

$$I_{\phi} = S_{\Sigma} \Phi$$

где Φ — световой поток светоизлучательного диода, образующего входную цепь; S_{Σ} — интегральная чувствительность фотодиода.

Для фотогенераторного режима при холостом ходе на выходе оптрона выходной ток равен нулю, т.е. $I_{\text{вых}} = 0$ и $U_{\text{вых}} = [U_{\text{вых}}]_{\text{хх}} = E_{\phi}$

$$I_{\phi} = I_0 \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \text{ или } I_{\phi} = I_0 \left(\exp \frac{qE_{\phi}}{kT} - 1 \right)$$

где E — фото-ЭДС.

$$E_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right] = \frac{kT}{q} \left[\frac{S\Phi}{I_0} + 1 \right]$$

$$\Phi = I_{\text{ex}} \eta_{\phi}$$

где η_{ϕ} — коэффициент полезного действия светодиода

$$E_{\phi} = \frac{kT}{q} \left[\frac{S\eta_{\phi} I_{\text{ex}}}{I_0} + 1 \right] \quad (1)$$

Для короткого замыкания на выходе оптрона $E_{\phi} = 0$, поэтому в соотношении (1) вместо теплового тока I_0 необходимо подставить значение фототока при коротком замыкании фотодиода:

$$I_{\phi, \text{кз}} = S_{\Sigma} \eta_{\phi} I_{\text{ex}}$$

Тогда коэффициент передачи по току оптрона в фотогенераторном режиме при коротком замыкании на выходе определится соотношением

$$K_i = \frac{I_{\phi, \text{кз}}}{I_{\text{ex}}} = S_{\Sigma} \eta_{\phi} \quad (2)$$

Фотогенераторный режим фотодиода описывается его вентильными вольт-амперными характеристиками, $E_{\phi} = f(I_{\phi})$ (рис.6). Параметрами этих характеристик является $E_{\phi, x, x}$ — фото-ЭДС холостого хода при заданном входном токе оптрона.

Обратное включение фотодиода при напряжении, большем 0,5 В, приводит к увеличению обратного тока за счет электронов и дырок, генерированных излучением. Такой режим называется фотодиодным, и ему соответствует семейство выходных характеристик оптрона: $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$ при $I_{\text{вх}} = \text{const}$ — зависимость выходного тока от выходного напряжения при определенном входном токе (рис.7). При отсутствии входного тока характеристика проходит через начало координат и определяется темновым током р-п-перехода (тепловой ток обратновключенного перехода I_0).

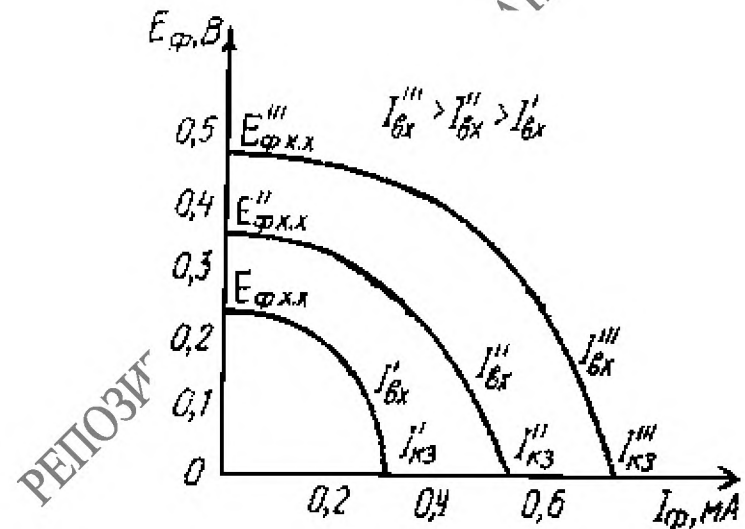


Рис.6. Вентильные вольт-амперные характеристики диодного оптрона в фотогенераторном режиме

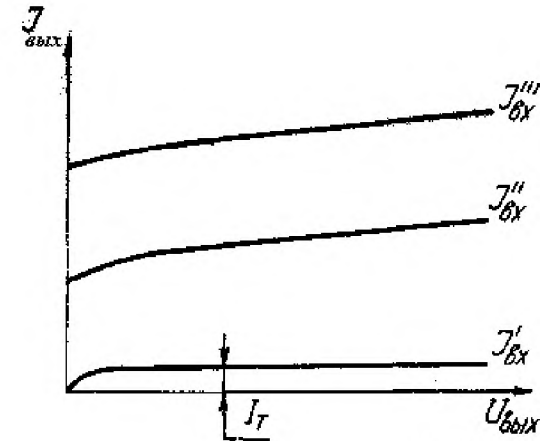


Рис.7. Выходные характеристики диодного оптрона в фотодиодном режиме

Под действием светового потока светодиода, через который протекает ток $I_{вх}$, на выходе оптрона появляется фототок и характеристика смещается вверх, пропорционально входному току. Значение фототока на выходе оптрона практически линейно возрастает с увеличением светового потока излучающего диода.

Диоды излучателя и приемника изготавливаются по планарной технологии. Структуры соединяются между собой оптически прозрачным клеем, слой которого обеспечивает надежную изоляцию входной цепи оптрона от его выходной цепи.

Кроме выходных характеристик в фотогенераторном и фотодиодном режимах для описания свойств диодных оптронов применяют входные характеристики, а также передаточные характеристики в фотогенераторном и фотодиодном режимах. Передаточная характеристика в фотодиодном режиме представляет собой зависимость выходного тока от входного тока:

$$I_{вых} = f(I_{вх}) \text{ при } U = \text{const}$$

и практически линейна в широком диапазоне входного тока.

Передаточная характеристика в фотогенераторном режиме нелинейна, так как фото-ЭДС при увеличении входного тока стремится к насыщению. Фото-ЭДС не превышает контактной

разности потенциалов p - n -перехода и составляет $0,5 \dots 0,8$ В.

В тиристорном оптроне в качестве фотоприемника используется кремниевый фототиристор.

Фототиристор, так же как и обычный тиристор, имеет четырехслойную p - n - p - n -структуру (рис. 8, б). Конструктивно оптопара выполнена так, что основная часть излучения входного светодиода направлена на высокоомную n -базовую область фототиристора.

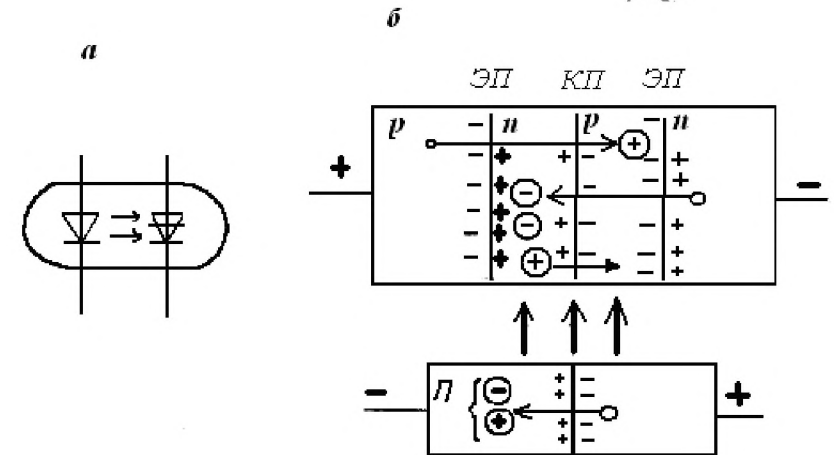


Рис. 8. Схемное обозначение (а) и устройство тиристорного оптрона (б).

К крайним областям (p -аноду и n -катоду) прикладывается внешнее выходное напряжение плюсом к аноду. При облучении в n -базе генерируется пары носителей заряда — электронов и дырок. Электрическим полем коллекторного перехода носители заряда разделяются между n - и p -областями. Электроны остаются в n -базе, а дырки экстрагируются в p -базу, заряжая n -базу отрицательно, p -базу положительно и снижая тем самым высоту энерге-

тических барьеров эмиттерных переходов. Возникает инжекция носителей заряда через эмиттерные переходы в p - n -базы, где эти носители оказываются неосновными. Неосновные носители, продиффундировав к коллекторному переходу, затем экстрагируются полем перехода в базы, где становятся основными, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему повышению неравновесных зарядов основных носителей баз, снижению высоты энергетических барьеров эмиттерных переходов и дальнейшему увеличению инжекции. Процесс оказывается регенерационным. Регенерационное нарастание тока через структуру приводит к отпираанию тиристора. Коллекторный переход насыщается подвижными носителями заряда и оказывается смещенным так же, как и эмиттерные переходы, в прямом направлении.

Падение напряжения на фототиристоре в открытом состоянии получается малым. Фототиристор остается открытым и после прекращения действия излучения. Чтобы перевести фототиристор в высокоомное состояние, необходимо снять внешнее напряжение с его электродов.

Если тиристор включается в цепь переменного или пульсирующего напряжения, то его выключение происходит в каждый из периодов при снижении напряжения и тока через тиристор до значений, при которых не может поддерживаться включенное состояние структуры.

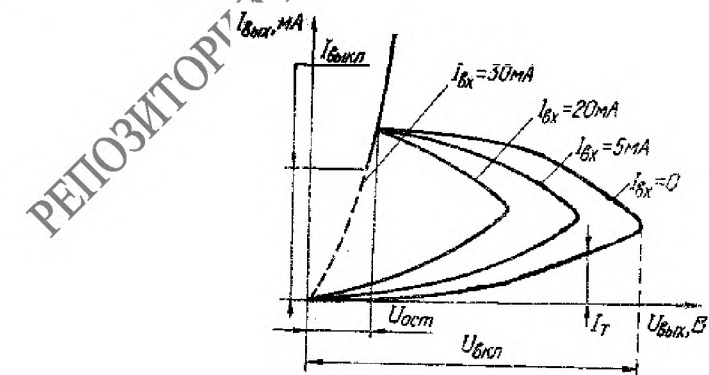


Рис. 9. Выходные характеристики тиристорного оптрона.

На рис.9 показано семейство выходных вольт-амперных характеристик тиристорного оптрона. Параметром семейства является входной ток излучающего диода $I_{вх}$. При отсутствии входного сигнала, что соответствует необлученному состоянию n -базы, через фототиристор протекает темновой ток I_t (ток обратновключенного коллекторного перехода). Повышение выходного напряжения до значения $U_{вкл}$ переводит тиристор во включенное состояние. Напряжение включения определяется величиной излучения, т.е. входным током оптрона. При некотором значении входного тока (рис. 9 при $I_{вх} = 30$ мА) происходит спрямление характеристики, что соответствует включенному состоянию фототиристора. Этот входной ток называется *током спрямления вольт-амперной характеристики* $I_{спр.вх}$ и является параметром тиристорного оптрона. При подаче на вход тока $I_{спр. вх}$ входная характеристика становится подобной прямой ветви характеристики инжектирующего p - n - перехода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: изучение устройства и принципа работы оптронов, измерение основных характеристик и определение параметров оптронов.

Приборы и принадлежности: стенд для измерения характеристик и параметров оптронов, источники постоянного тока (30 В), резисторные, диодные и тиристорные оптроны.

Порядок выполнения

1. На стенде по схеме, представленной на рис 1. провести измерение для определения входной и выходной характеристик резисторной оптопары.
2. Получив семейство статических выходных характеристик резисторной оптопары определить зависимость светового сопротивления от входного тока.
3. Для диодной оптопары по схеме (см. рис. 5) определить вен-

- тельные вольт-амперные характеристики в фотогенераторном режиме и выходные характеристики в фотодиодном режиме.
4. Провести измерения по определению передаточных характеристик диодной оптопары в фотогенераторном и фотодиодном режимах.
 5. Для тиристорной оптопары определить выходные характеристики и ток спрямления вольт-амперной характеристики.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова структурная схема оптрона и его принцип работы?
2. Какие существуют типы оптронов и их особенности?
3. Какие основные характеристики и параметры оптопар?
4. Где применяются оптроны?

Литература

1. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.Н. Введение в оптоэлектронику. - М.: «Высшая школа», 1991.
2. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. оптроны и их применение. – М.: Радио и связь, 1981.
3. Мартынов В.Н., Кольцов Г.И.. Полупроводниковая оптоэлектроника. – М.: «МИСИС», 1999.
4. Быстров Ю.А. Оптоэлектронные приборы и устройства. – М.: издат. предприятие. РадиоСофт, 2001.
5. Валенко В.С, Хандогин М.С. Электроника и микросхемотехника. – Мн.: «Беларусь», 2000.

ТЕМА 7. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Фотодиоды с р-п – переходом и с р-і-п – переходом.
2. Фотодиоды с барьером Шоттки, лавинные фотодиоды.
3. Конструкции фотодиодов и схемы включения.
4. Применение фотодиодов.

Измерительные преобразователи на основе фотодиодов включают фотодиод и цепь нагрузки (пассивную или активную) и предназначены для выработки сигнала измерительной информации в форме электрического сигнала.

Измерительные преобразователи могут работать в режиме непосредственного отсчета, когда выходной электрический сигнал в каждый момент времени пропорционален интенсивности падающего на фотодиод излучения (т.е. это преобразователи мгновенного действия), и в режиме с накоплением заряда, когда выходной сигнал пропорционален заряду, накапливаемому собственной ёмкостью фотодиода (или подключённой параллельно фотодиоду) за некоторое время накопления.

Для измерительных преобразователей с накоплением заряда характерно наличие устройства коммутации, периодически подключающего накопительную ёмкость к источнику внешнего смещения или разряжающего до её исходного состояния.

Кроме названных преобразователей можно выделить так называемые трансимпедансные преобразователи на основе пары фотодиод — операционный усилитель (ОУ). Под трансимпедансом в данном случае понимается передаточное сопротивление пары фотодиод-ОУ, т.е. коэффициент преобразования фототока в напряжение на выходе ОУ.

Измерительные преобразователи мгновенного действия. Так как в вентильном режиме ток фотодиода пропорционален мощности излучения лишь при малых сопротивлениях нагрузки, то в измерительных преобразователях мгновенного действия используется включение фотодиода с внешним источником смещения (рис. 1).

Напряжение на нагрузке фотодиода в этом случае

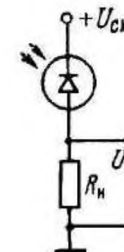


Рис. 1. Схема измерительного преобразователя с внешним источником смещения

$$U_n = (S_\lambda P + I_s) R_n \quad (1)$$

где S_λ -токовая чувствительность фотодиода на длине волны λ , P -мощность излучения, I_s -ток смещения (темновой ток).

При измерении энергетических параметров непрерывного излучения преобразователь будет обладать систематической погрешностью из-за прохождения через нагрузку темнового тока и случайной погрешностью, обусловленной флуктуациями темнового тока при изменениях температуры окружающей среды. Систематическую погрешность можно устранить введением компенсирующего источника тока. Для уменьшения случайной составляющей погрешности ток компенсирующего источника должен меняться по тому же закону, что и темновой ток фотодиода. На рис.2, приведены различные схемы компенсации темнового тока.

Для исключения влияния темнового тока применяется также пространственная модуляция потока излучения. Например, верхняя граница линейного динамического диапазона преобразователя мгновенного действия определяется напряжением смещения и сопротивлением нагрузки и для кремниевого фотодиода ФД-7К составляет 10^{-2} Вт при $R_n=500$ Ом и $E_{cm}=30$ В. Нижняя граница динамического диапазона определяется шумами фотодиода вида $1/f$. Для реализации пороговой чувствительности необходимо увеличивать сопротивление нагрузки и осуществлять перенос спектра сигнала в более высокочастотную область путем модуляции.

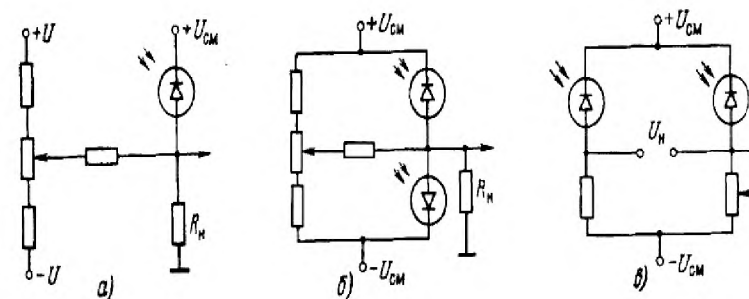


Рис. 2. Схемы компенсации темнового тока.

а- термозависимая с пассивным делителем; б - термозависимая с дополнительным затемненным фотодиодом; в- мостовая

При воздействии импульсного излучения на фотодиод выражение (1) справедливо при выполнении условия $\tau_n > \tau$, где τ_n – длительность импульса излучения, а τ – постоянная времени фотодиода. Если $\tau_n \ll \tau$, то отклик фотодиода (напряжение на собственной емкости фотодиода U_ϕ) будет пропорционален энергии импульса излучения W :

$$U_\phi = \frac{q}{C_\phi} = \frac{1}{C_\phi} \int_0^{\tau_n} i_\phi(t) dt = W \frac{S_\lambda}{C_\phi} \quad (2)$$

где q -заряд, накапливаемый на емкости фотодиода C_ϕ .

Таким образом, интегрирование фототока $i_\phi(t)$ осуществляется собственной емкостью фотодиода, значение которой согласно (2) пропорционально напряжению смещения в степени минус 1/2. Изменение напряжения смещения на фотодиоде вследствие изменения заряда на емкости C_ϕ при интегрировании импульса фототока, а также вследствие изменения интенсивности фоновой засветки приводит к появлению существенной динамической погрешности. Для уменьшения влияния этой погрешности параллельно фотодиоду подключают емкостную нагрузку (рис.3).

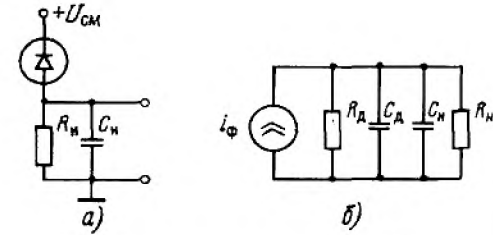


Рис. 3. Схема интегрирующего преобразователя (а) и его эквивалентная схема

С учетом эквивалентной схемы амплитуда импульса на суммарной емкости $C = C_d + C_n$

$$U_c = WS_\lambda / (C_d + C_n),$$

где $S_\lambda / (C_d + C_n)$ - коэффициент преобразования энергии импульса излучения.

Для исключения влияния неустойчивости собственной емкости фотодиода на точность измерений необходимо выполнять условие $C_n \gg C_d$, но при этом уменьшается коэффициент преобразования из-за увеличения времени разряда суммарной емкости через R_n .

При невыполнении условия $\tau_3 \gg \tau_n$ и начинается сказываться баллистическая погрешность обусловленная неидеальностью интегрирования. Здесь $\tau_3 = R_n R_d (C_n + C_d) (R_n + R_d)^{-1}$ - постоянная времени эквивалентной цепи нагрузки. Баллистическая погрешность превышает 0,01 при $\tau_3 \geq 50\tau_n$. Максимальная энергия импульса излучения, измеряемая фотодиодом в схеме интегрирующего преобразователя в пределах линейной аппроксимации его ватт-амперной характеристики,

$$W_{\max} = U_{cm} (C_n + C_d) (S_\lambda A)^{-1} \quad (3)$$

где A — нормированная площадь импульса, равная отношению энергии импульса излучения к его пиковой мощности.

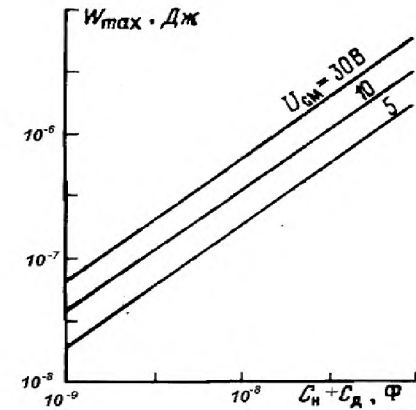


Рис. 4. Зависимость максимальной энергии импульса излучения от суммарной емкости

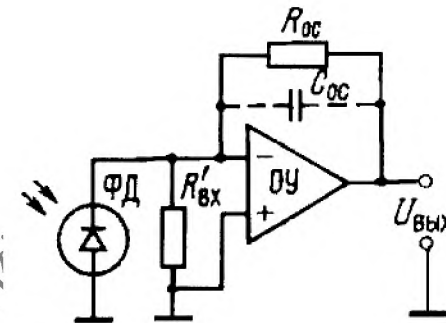


Рис. 5. Схема измерительного преобразователя на основе пары фотодиод — операционный усилитель

Из выражения (3) следует, что значение $W_{\max}$ возрастает при увеличении C_n . Реальное значение $W_{\max}$ ограничивается сопротивлением растекания носителей в базовом слое R_b и сопротивлением толщи полупроводника, которые в данном случае не учитывались. На рис.4 приведена зависимость максимальной энергии импульса излучения от суммарной емкости при различных

напряжениях смещения фотодиода.

Измерительные преобразователи на основе пары фотодиод — операционный усилитель. В технике измерения малых токов высокоомных источников используется принцип измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении, охваченной параллельной отрицательной обратной связью по напряжению. При этом к усилителю предъявляются требования наличия высокого входного сопротивления и большого коэффициента усиления при малых уровнях шумов. Успехи микроэлектроники позволили создать интегральные операционные усилители (ОУ), обладающие симметричным входом, высоким коэффициентом усиления, высокой надежностью, которые оказались чрезвычайно удобными для создания преобразователей, включающих полупроводниковые фотодиоды, и ОУ с входными каскадами на полевых транзисторах. Использование во входном каскаде ОУ полевых транзисторов обеспечивает низкие значения шумовых входных токов, ЭДС и токов смещения усилителя. ЭДС смещения усилителя в рабочем диапазоне температур также оказывается меньшей из-за дифференциальной схемы входного каскада. При этом фотодиод работает как генератор тока, а ОУ служит преобразователем этого тока в напряжение (рис.5).

Если операционный усилитель с разомкнутой петлей обратной связи имеет коэффициент усиления $K'_и$ и входное сопротивление $R'_{вх}$, то входное сопротивление ОУ с замкнутой петлей обратной связи уменьшается и становится равным $R_{вх} = R'_{вх} / K'_и$. Это сопротивление является нагрузкой фотодиода и при $R'_{вх} = 10^6 \dots 10^7$ Ом и $K'_и \approx 5 \cdot 10^5$ (для современных ОУ) может быть равным $2 \dots 20$ Ом. Уменьшение нагрузки позволяет повысить линейность световой характеристики, при этом выходное напряжение

$$U_{вых} = -PS_{\lambda} R_{oc}$$

а динамический диапазон преобразователя сверху ограничивается напряжением питания ОУ, т.е. $U_{вых\max} \approx U_{пОУ}$.

Динамический диапазон снизу ограничивается минимальной обнаруживаемой мощностью излучения :

$$P_{\min} = 1,28 \cdot 10^{-10} \cdot S_{\lambda}^{-1} (\Delta f / R_{oc})^{1/2},$$

где Δf — ширина полосы пропускания. При $R_{oc}=10^7$ Ом и $S=0,25$ А/Вт на $\lambda=0,63$ мкм в единичной полосе пропускания $P_{min}\approx 10^{-13}$ Вт.

При использовании усилителя напряжения постоянная времени определяется из эквивалентной схемы рис.3,б:

$$\tau = R_n R_d (R_n + R_d)^{-1} (C_n + C_d)$$

Так как $R_d \gg R_n$, то $\tau \approx R_n (C_n + C_d)$. Поскольку в преобразователе на основе пары ФД—ОУ напряжение на фотодиоде равно $U_{вых}/K'_n$ и при $K'_n \gg 1$ остаётся в пределах нескольких милливольт, влияние ёмкости C_d исключается и постоянная времени определяется произведением $R_{oc} C_{oc}$, где C_{oc} — паразитная ёмкость резистора обратной связи. Следовательно, верхняя граница частотной характеристики определяется либо постоянной $R_{oc} C_{oc}$ [если $1/(2\pi R_{oc} C_{oc}) < f$], либо частотой единичного усиления f' ОУ [если $1/2\pi R_{oc} C_{oc} > f$].

В первом случае при воздействии импульсного излучения интегрируется фототок, т. е. выходной сигнал ОУ пропорционален энергии импульса излучения. При этом допустимая частота следования импульсов определяется постоянной времени разряда $R_{oc} C_{oc}$. Во втором случае выходной сигнал ОУ пропорционален мощности излучения (импульсного и непрерывного). При интегрировании импульсов фототока минимальная длительность импульса должна быть больше постоянной времени установления ОУ. В противном случае из-за отсутствия обратной связи в начальный момент времени ОУ будет работать в нелинейном режиме с большой погрешностью.

Возможны две схемы преобразователей на основе пары ФД—ОУ (рис.6). По схеме на рис.6, а измеряется мощность непрерывного излучения или энергия импульсов излучения при оговоренных выше допущениях, по схеме на рис.6,б измеряется мощность непрерывного излучения, а также энергия как постоянных, так и импульсных источников излучения. При использовании ОУ с входным каскадом на полевых транзисторах с токами утечки порядка 10^{-10} А скорость разряда интегрирующего конденсатора ёмкостью 10^{-6} Ф составит около 10^{-4} В/с, следовательно, такой преобразователь можно использовать для сумми-

рования энергии повторяющихся импульсов излучения.

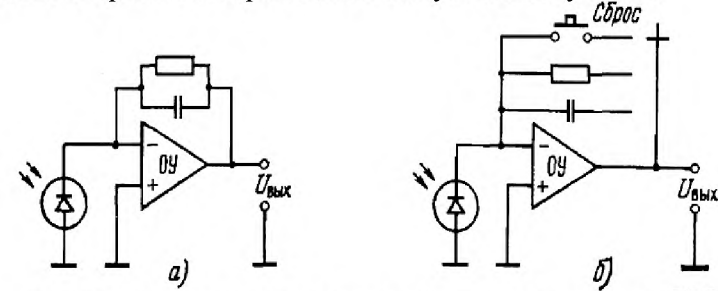


Рис. 6. Схемы преобразователей на основе пары фотодиод - операционный усилитель

Можно отметить следующие схемотехнические особенности преобразователя на основе пары ФД—ОУ:

ОУ с высоким коэффициентом усиления ($K'_и \gg 1$), охваченный глубокой отрицательной обратной связью по напряжению, обеспечивает выходной сигнал

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{ос}} I_{\text{ф}} \quad \text{или} \quad U_{\text{вых}} = -\frac{1}{C} \int_0^t I_{\text{ф}}(t) dt$$

; осуществляется частотная коррекция сигнала ($\tau = R_{\text{ос}} C_{\text{ос}}$), расширение температурного диапазона постоянства $U_{\text{вых}}$, поскольку $U_{\text{вых}}$ зависит от температуры только через температурную зависимость $I_{\text{ф}}$, обеспечивает также стабилизация $U_{\text{вых}}$ при изменении $K'_и$ за счёт вариации температуры, напряжения питания и ухода параметров элементов схемы;

существенно расширяется динамический диапазон $U_{\text{вых}}$ при сохранении заданного порога чувствительности;

ОУ автоматически поддерживает на фотодиоде смещение в пределах $U_{\text{вых}}/K'_и \approx 1..2$ мВ, поэтому шумы вида $1/f$ минимальны.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Цель работы: изучение принципа работы измерительных преобразователей на основе фотодиодов, снятие их характеристик.

Приборы и принадлежности: твердотельный лазер, He-Ne-лазер, измерительный преобразователь на основе фотодиода, измеритель энергии и мощности лазерного излучения.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему с внешним источником смещения и провести измерения зависимости напряжения сигнала на нагрузке фотодиода от мощности излучения лазера (He-Ne-лазера или лазера на АИГ).
2. Провести измерения для определения световой характеристики преобразователя на основе пары фотодиод — операционный усилитель.
3. Построить световую характеристику фотопреобразователя.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие измерительные преобразователи используют принцип накопления зарядов?
2. Что такое трансимпедансные преобразователи и их схемы?
3. Какие схемы применяются для компенсации темнового тока?
4. Какие существуют преобразователи на основе ФД-ОУ?

Литература

1. Корндорф С. Ф., Дубиновская А. И. и др. Расчет фотозлектрических цепей. -М.: Энергия, 1967.
2. Игнатьев В.Г., Фокина Н.Н. Световые характеристики фотодиодов в импульсном режиме освещения.-В кн.: Импульсная фотометрия. -Л.: Машиностроение, 1975, вып. 4.
3. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения / Под ред.П.Иссперса, Ф. Ван де Зиле, М. Уайта.- М.: Мир, 1979.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**МЫШКОВЕЦ Виктор Николаевич
МАКСИМЕНКО Александр Васильевич
ГРИЩЕНКО Виталий Владимирович**

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

**Практическое пособие по выполнению
лабораторных работ**

В авторской редакции

Подписано в печать 23.12.2004 г. (76) Формат 60х84 1/16. Бумага писчая №1. Печать на ризографе. Гарнитура «Таймс». Усл.-п.л. 3,8 с. Уч.изд.л. 2,5 с. Тираж 25 экз.

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
246019, г. Гомель, ул. Советская, 104

Отпечатано в учреждении образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
246019, г. Гомель, ул. Советская, 104