

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

А. В. МАКСИМЕНКО, В. Н. МЫШКОВЕЦ, Г. А. БАЕВИЧ

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДЫ ПРИЕМА И ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Практическое пособие

для студентов специальностей
1–39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1–31 04 03 «Физическая электроника»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2022

УДК 621.372.2(076)
ББК 32.854я73
М171

Рецензенты:

кандидат технических наук О. А. Саркисов,
кандидат технических наук Н. Н. Федосенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Максименко, А. В.

М171 Оптоэлектроника. Методы приема и генерации оптического
излучения : практическое пособие / А. В. Максименко,
В. Н. Мышковец, Г. А. Баевич ; Гомельский гос. ун-т им.
Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – 34 с.
ISBN 978-985-577-828-9

Практическое пособие содержит 4 лабораторные работы по базовым
разделам курса «Оптоэлектроника». Каждая работа включает краткие тео-
ретические сведения по теме, порядок выполнения и вопросы для само-
контроля.

Предназначено для студентов факультета физики и информационных
технологий специальностей 1–39 03 01 «Электронные системы безопасно-
сти», 1–31 04 03 «Физическая электроника».

УДК 621.372.2(076)
ББК 32.854я73

ISBN 978-985-577-828-9

© Максименко А. В., Мышковец В. Н.,
Баевич Г. А., 2022
© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Лабораторная работа 1. Изучение характеристик фоторезисторов...	5
Лабораторная работа 2. Изучение характеристик фотогальванических преобразователей.....	13
Лабораторная работа 3. Изучение характеристик полупроводниковых светоизлучающих диодов.....	19
Лабораторная работа 4. Фотоэлектрические измерения параметров носителей заряда в полупроводниках.....	25
Литература.....	34

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптическая электроника, или оптоэлектроника – одно из самых актуальных направлений современной электроники.

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

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

Практическое пособие подготовлено в соответствии с требованиями учебного плана по дисциплине «Оптоэлектроника» для специальностей 1–31 04 03 «Физическая электроника» и 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности».

Данное издание написано на основе изучения, систематизации и отбора литературы по полупроводниковой оптоэлектронике, а также на базе материалов лекций по учебному курсу «Оптоэлектроника».

Основная цель – дать представление о физических процессах, лежащих в основе действия приемников и источников излучения, об их конструктивно-технологических особенностях и о методах измерения характеристик и параметров. Содержит задачи, решение которых поможет студентам расширить уровень знаний, приобретенных в ходе лекционных занятий по курсу «Оптоэлектроника», приобрести практические навыки по определению основных характеристик и параметров приемников и источников излучения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРОВ

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

Оборудование: микроамперметр, вольтметр для постоянного тока (15—150 В), реостат, источник постоянного тока, электромеханический модулятор, магазин сопротивлений (РЗЗ), осциллограф, люксметр, фоторезисторы (ФСК, ФСД, ФСА и др.), монохроматические фильтры или монохроматор УМ-2.

Теоретические сведения

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

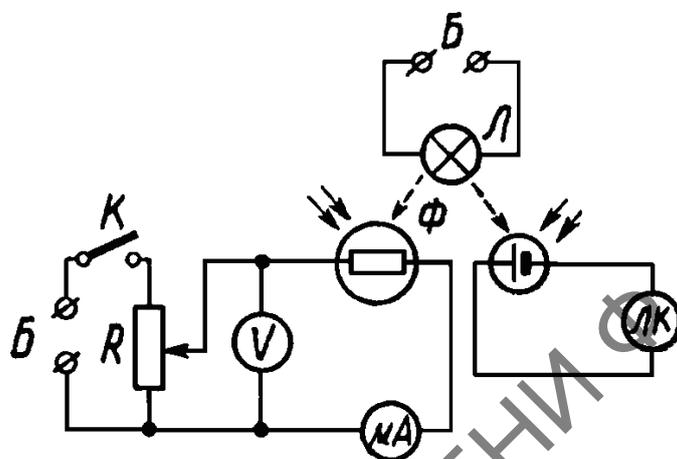
$$I = CU, \quad (1.1)$$

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

При изучении вольт-амперных характеристик фоторезисторов обычно получают характеристики в темноте и при различных освещенностях поверхности светочувствительного слоя фоторезистора, снимая их одновременно (рисунок 1.1). 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, приложенного к фоторезистору, от нуля до номинального значения для данной освещенности E через каждые 1–5 В находят зависимости: $I_T = f(U)$ и $I_{\phi} = f(U)_{E = \text{const}}$.

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



L – осветительная лампа, Φ – фоторезистор;
 μA – микроамперметр (многопредельный); V – вольтметр; R – потенциометр;
 K – ключ; B – источник постоянного тока (15–150 В); $ЛК$ – люксометр

Рисунок 1.1 – Принципиальная схема для снятия характеристик фоторезисторов

Зависимости $I_T = f(U)$ и $I_{\phi} = f(U)_{E = \text{const}}$ 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 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

$$I_\phi = C_1 \Phi^\alpha U = C_1 U S^\alpha E^\alpha, \quad (1.2)$$

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 (рисунок 1.1). Устанавливают напряжение U (в пределах допустимых значений) и, изменяя освещенность фоторезистора источником света, измеряют каждый раз люксметром освещенность E и микроамперметром токи I_T и I_C вычисляют ток I_ϕ . Снимают зависимость $I_\phi = f(E)_{U=\text{const}}$ 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 $T = 2848 \text{ K}$

$$K_{\text{и}} = \frac{I_\phi}{\Phi}. \quad (1.3)$$

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

$$K_{\text{у}} = \frac{I_\phi}{\Phi U}. \quad (1.4)$$

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 $\lambda, \lambda+d\lambda$

$$K_\lambda = \frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda}. \quad (1.5)$$

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_x и K_y 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_x и K_y по формулам (1.3) и (1.4). Для видимой части спектра чувствительности K_x и K_y имеют размерности:

$$[K_x] = \left[\frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right], [K_\lambda] = \left[\frac{\text{мкА}}{\text{нм}} \right].$$

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

$$\frac{R_T}{R_C} = \frac{I_C}{I_T} \quad (1.6)$$

и относительному изменению сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_C}{R_C} \cdot 100 \% . \quad (1.7)$$

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:

$$R_T = \frac{U_p}{I_T}, \quad (1.8)$$

$$R_C = \frac{U_p}{I_C}. \quad (1.9)$$

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 которого фототок уменьшается в e раз (на 63 %) после прекращения освещения фоторезистора. Она характеризует инерционность фоторезистора, связанную со временем жизни избыточного носителя заряда ($\tau = \frac{1}{N S v}$, 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 (длительность светового импульса и темнового промежутка равна t ($t > \tau$)), то за время освещения образца будет устанавливаться стационарное значение фотопроводимости, а за время темноты фотопроводимость будет уменьшаться до нуля. Спад фотопроводимости, обусловленный уменьшением неравновесной концентрации при затемнении, приблизительно можно считать происходящим по закону $\Delta \sigma = \tau_n \beta K L q_0 u_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}$, а фототок в цепи фоторезистора – изменяющимся по закону

$$I_{\phi} = I_{\phi_{ст}} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.10)$$

Для определения величины τ методом затухания фотопроводимости (рисунок 1.2) 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 приблизительно по закону

$$U_n = I R_n = U_{ст} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.11)$$

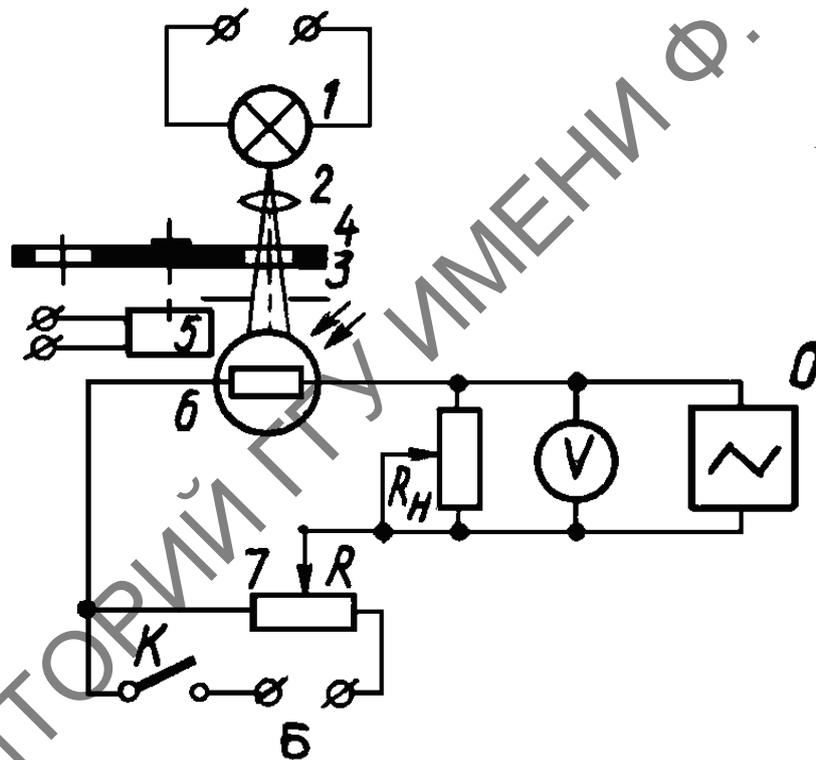
Если $\frac{U_{ст}}{U_n} = 2$ (уменьшилось в два раза), то релаксационное время

жизни

$$\tau = \frac{t_1}{\ln 2}, \quad (1.12)$$

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.



- 1 – лампа осветителя; 2 – конденсорная линза; 3 – щель;
 4 – диск модулятора (обтюратор); 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

Рисунок 1.2 – Принципиальная схема определения постоянной времени τ методом затухания фотопроводимости

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 спадаания его при затемнении, различают постоянную времени нарастания τ_n и спадаания $\tau_{сп}$. 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 спадаания 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 спадаания фототока до требуемого уровня 63 % от установившегося значения тока.

У всех фоторезисторов постоянные времени по нарастанию и спадаанию 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, представленная на рисунке 1.2. 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 электро-механическим модулятором.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 1.1) 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 (рисунок 1.2), 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 определить 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? Каковы их характеристики и параметры?
3. Какие основные достоинства и недостатки фоторезисторов?
4. Где применяются фоторезисторы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение характеристик фотогальванических преобразователей, снятие характеристик фотоэлемента, солнечной батареи и фотодиода.

Оборудование: потенциометр, микроамперметр, вольтметр (30 В), реостат, люксметр, магазин сопротивлений (РЗЗ), источник света с конденсором, электромеханический модулятор света, монохроматор или набор монохроматических фильтров, осциллограф, источник постоянного тока (30 В), фотоэлементы (кремниевый, селеновый и др.), солнечная батарея, фотодиод.

Теоретические сведения

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 фотоэлектрических преобразователях, как фотоэлементы, солнечные батареи и фотодиоды.

Каждый фотоэлемент характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих не только его свойства, но и пределы применимости в технике. К основным из них относятся: вольт-амперная,

световая, частотная и спектральная характеристики, интегральная и спектральная чувствительности, КПД.

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

$$I_H = I_\phi - I_s \left(e^{\frac{q_0 \varphi_H}{AkT}} - 1 \right). \quad (2.1)$$

При $R_H = 0$ точка, лежащая на оси токов, соответствует току $I_{к.з.}$, так как при $R_H = 0$ $\varphi_H = 0$ и из выражения (2.1) имеем: $I_H = I_{к.з.} = I_\phi$, т. е. точка пересечения вольт-амперной характеристики с осью токов дает значение $I_{к.з.}$.

При $R_H \rightarrow \infty$ точка, лежащая на оси токов, соответствует фото-ЭДС, так как при $R_H \rightarrow \infty$ $I_H = 0$ и из выражения (2.1) имеем: $\varphi_H = \varphi_{х.х.}$, т. е. точка пересечения вольт-амперной характеристики с осью напряжений дает значение фото-ЭДС.

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

Световые (интегральные) характеристики выражают зависимость фото-ЭДС, тока короткого замыкания и тока нагрузки от освещенности или светового потока: 1) $\varphi_{х.х.} = f(E)$, 2) $I_{к.з.} = f(E)$, 3) $I_H = f(E)$. Зависимость тока $I_{к.з.}$ ($I_{к.з.} = I_\phi$) от освещенности в широких пределах изменения 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 сопротивлению нагрузки $I_H = f(v_M)$. Когда на поверхность фотоэлемента падает переменный световой поток с частотой модуляции v_M , то сила возникающего при этом тока I_H зависит от v_M . С увеличением v_M сила тока I_H уменьшается из-за инерционности фотоэлементов.

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

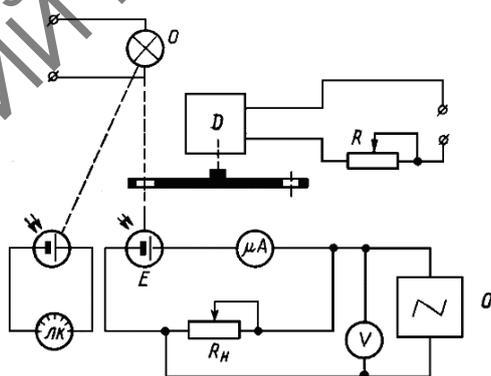
$$\frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_\lambda} = f(\lambda).$$

Для снятия характеристик фотоэлемента собирают схему (рисунок 2.1).

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

Вычислив напряжение ϕ_H [$\phi_H = I_H (R_\Gamma + R_H)$] при различных значениях тока I_H строят график зависимости $I_H = f(\phi_H)_{E = \text{const}}$, по которому определяют $I_{\text{к.з.}}$ и $\phi_{\text{х.х.}}$, где R_Γ – внутреннее сопротивление фотоэлемента.

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



D – двигатель с диском (электромеханический модулятор); R – реостат;
 O – осветительная лампа; $ЛК$ – люксметр; E – фотоэлемент; μA – микроамперметр;
 R_H – магазин сопротивлений (P-33); V – вольтметр; O – осциллограф

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема для снятия характеристик и наблюдения релаксации фототока в цепи фотоэлемента

При снятии частотной характеристики устанавливают определенное значение сопротивления R_H (например, $R_H = 1000 \text{ Ом}$) 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, находят 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.

Для снятия характеристик фотодиода собирают схему, изображенную на рисунке 2.2.

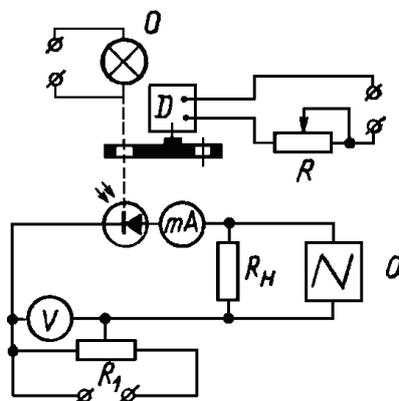


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема для снятия характеристик и наблюдения релаксации фототока в цепи фотодиода

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 характеристики он регистрируется осциллографом. Освещенность измеряется люксметром.

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

– при включенном свете

$$I_{\phi} = I_{\phi.ст} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right); \quad (2.2)$$

– при выключенном свете

$$I_{\phi} = I_{\phi.ст} e^{-\frac{t}{t_0}}. \quad (2.3)$$

Здесь $I_{\phi.ст}$ – стационарное значение фототока при данной освещенности, а инерционность в режиме фото-ЭДС определяется временем жизни τ неосновных носителей заряда

$$I_{\phi} = I_{\phi.ст} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.4)$$

и

$$I_{\phi} = I_{\phi.ст} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.5)$$

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 (рисунки 2.1, 2.2).

При освещении фотоэлемента прямоугольными световыми импульсами (рисунок 2.1) фототок в цепи фотоэлемента будет изменяться по законам (2.2), (2.3). 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 фотото-

ка 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 , укладываемых 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 (2.3).

При определении постоянной времени t_0 на фотодиод 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 , укладываемых на участке релаксационной кривой, на котором фототок уменьшается в 2,7 раза ($t_0 = N_1\tau^\circ$).

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 2.1) 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) $I_H = f(\Phi_H)_{E = \text{const}}$;
 - 2) $I_H = f(E)_{R_H = \text{const}}$;
 - 3) $D_H = f(v_M)_{R_H, E = \text{const}}$.
3. Определить по вольт-амперной характеристике фотоэлемента фото-ЭДС и ток короткого замыкания.
4. Для снятия характеристик фотодиода использовать схему, представленную на рисунке 2.2.
5. Снять спектральные характеристики для исследуемого фотодиода и фотоэлемента, определить 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_0 (рисунок 2.2).

7. Зарисовать кривые релаксации фото-ЭДС при большом уровне освещения.

Вопросы для самоконтроля

1. Каков механизм образования фото-ЭДС 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-ЭДС от величины светового потока, падающего на фотоэлемент?

5. Какие основные характеристики и параметры фотоэлементов и фотодиодов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Цель работы: изучение физических принципов генерации излучения в светоизлучающих диодах (СИД), схемы включения светодиодов и основных характеристик светодиодов.

Оборудование: вольтметр В7-40, источник питания постоянного тока, светодиоды (красный, желтый, зеленый), стенд для измерения индикатрисы направленности излучения СИД.

Теоретические сведения

Светодиод – это полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного оптического излучения.

Физической основой полупроводниковых излучателей является процесс инжекционной электролюминесценции, включающий в себя два основных этапа: генерацию носителей заряда и рекомбинацию. Выделяющаяся при этом энергия превращается либо в оптическое излучение, либо в теплоту (рисунок 3.1).

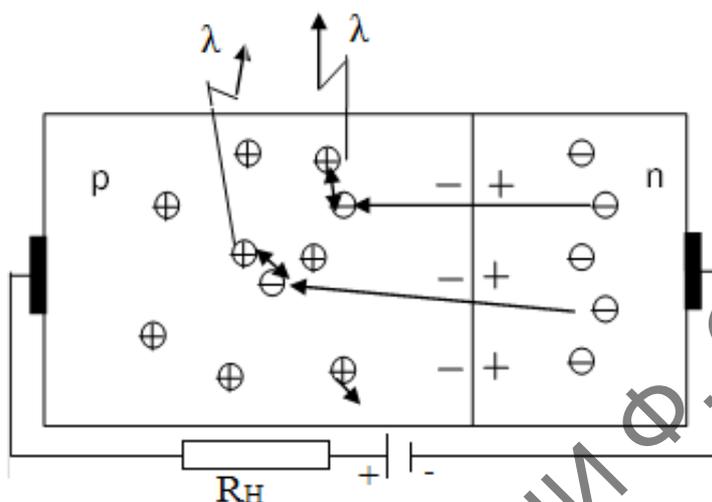


Рисунок 3.1 – Механизм излучения света в светоизлучающем диоде

Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости называется *генерацией*, а переход электрона из зоны проводимости в валентную зону называется *рекомбинацией*. При генерации носителей заряда поглощается энергия, а при рекомбинации энергия выделяется. Энергия может выделяться либо в виде света (излучательная рекомбинация), либо в виде тепла (безызлучательная рекомбинация). Наиболее эффективное превращение энергии в оптическое излучение происходит в прямозонных полупроводниках (полупроводники, у которых дно зоны проводимости расположено над потолком валентной зоны). Для большинства полупроводников вероятность излучательной рекомбинации намного меньше, чем у безызлучательной. Это объясняется следующей причиной. Реальная структура энергетических зон имеет сложный характер и положение E_c и E_v зависит от волнового числа электрона k (который связан с импульсом электрона). Различают полупроводники, у которых положение дна зоны проводимости совпадает с положением потолка валентной зоны – прямозонные полупроводники (например, GaAs), и полупроводники, у которых эти точки соответствуют различным значениям волнового вектора электронов – непрямоzonные материалы (Ge, Si). При рекомбинации электрон должен отдать не только энергию,

но и импульс. Поскольку фотон имеет очень маленький импульс, необходимо, чтобы в процессе излучательной рекомбинации в непрямозонных материалах участвовала третья частица, что существенно снижает вероятность излучения.

Длина волны фотонов, излучаемых при рекомбинации, определяется соотношением $\lambda \approx \frac{1,24}{E_g}$, где λ – длина волны в микрометрах; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника в электрон-вольтах.

Для работы в диапазоне видимого излучения (0,38–0,78 мкм) необходимы полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5–3,0 эВ. Поэтому основные материалы полупроводниковых излучателей – это соединения $A^{III}B^V$: GaP, GaAs, а также твердые растворы на их основе.

Светодиодная структура представляет собой электронно-дырочный переход, в котором одна из областей является эмиттерной, т. е. инжектирующей основные носители заряда (в данном случае – это n -область), а другая (в данном случае – p -область) – базовой. При приложении прямого напряжения потенциальный барьер понижается и начинается инжекция неосновных носителей: дырок – в n -область и электронов – в p -область. Инжектированные неосновные носители рекомбинируют вблизи p - n -перехода, обеспечивая генерацию оптического излучения. Обычно излучающей является область только по одну сторону p - n -перехода.

Зависимость параметров излучения от длины волны называется спектральной характеристикой излучающего диода. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. Так как рекомбинация обычно происходит не только между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны, а между двумя группами энергетических уровней, лежащими в зоне проводимости и в валентной зоне, то спектр излучения оказывается размытым.

Параметры светодиода как элемента электрической цепи определяются по его вольт-амперной характеристике (ВАХ) (рисунок 3.2). Различия прямых ветвей ВАХ светодиодов, излучающих свет с разной длиной волны, связаны с различием ширины запрещенной зоны применяемых материалов. Чем меньше длина волны излучения, тем больше ширина запрещенной зоны и больше прямое падение напряжения на излучающем диоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви ВАХ имеют малое допустимое обратное напряжение, так как ширина p - n -перехода в излучающих диодах незначительна.

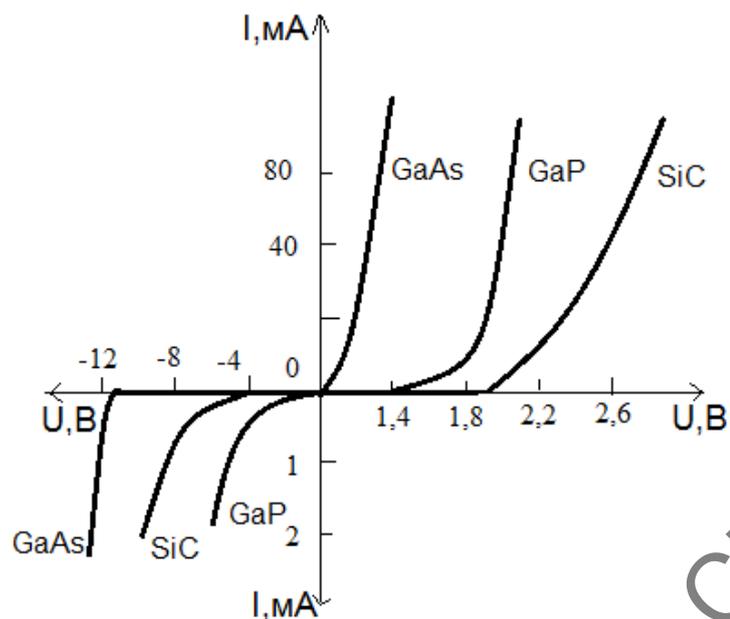


Рисунок 3.2 – ВАХ светодиодов

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока (рисунок 3.3). Время переключения $t_{пер}$ складывается из времени включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ излучения. Инерционность светодиода определяется процессом перезарядки барьерной емкости $p-n$ -перехода и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области диода.

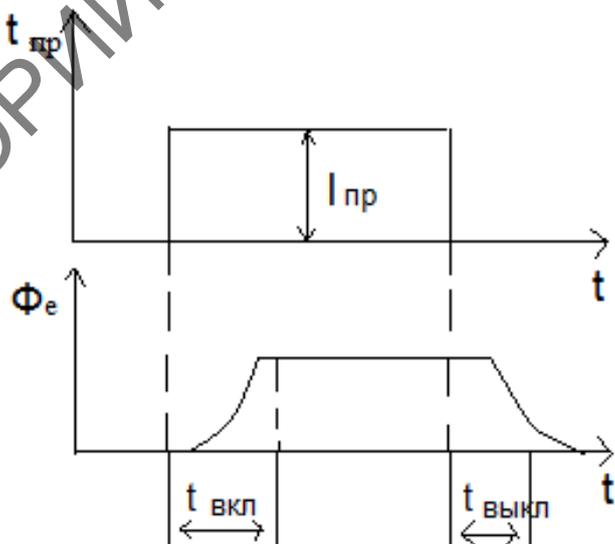


Рисунок 3.3 – Диаграмма переключения СИД

Важной особенностью светодиодов является присущая им деградация – постоянное уменьшение мощности излучения при длительном протекании через прибор прямого тока. Деградацию связывают с увеличением концентрации центров безызлучательной рекомбинации за счет перемещения в электрическом поле неконтролируемых примесных атомов.

Простейшая схема включения светодиода – схема с токоограничивающим резистором. Значение данного сопротивления может быть определено из соотношения

$$I_{\text{пр}} = \frac{(U_{\text{п}} - U_{\text{пр}})}{R}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания;

$I_{\text{пр}}, U_{\text{пр}}$ – прямой ток через светодиод и прямое падение напряжения на нем;

R – сопротивление токоограничивающего резистора.

Необходимость применения токоограничивающего резистора объясняется сильной нелинейностью ВАХ светодиода. Ток, протекающий через светодиод, не должен превышать 10–50 мА. Превышение оптимальной силы тока существенно сокращает срок службы светодиода. При отсутствии токоограничивающего резистора необходимо с высокой точностью задавать напряжение питания, так как из-за нелинейного характера ВАХ небольшие изменения прямого напряжения на светодиоде приводят к существенному изменению тока, протекающего через светодиод. К основным характеристикам СИД также относятся: спектральная характеристика излучения, яркостная характеристика и индикатриса излучения.

Индикатриса излучения (диаграмма направленности излучения) – это распределение яркости или силы излучения источника в пространстве или плоскости.

Индикатриса направленности излучения СИД в основном определяется его материалом и конструкцией.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рисунке 3.4.
2. Включить источник напряжения, установив напряжение питания 5 В.

3. Изменяя сопротивление переменного резистора, получить значения тока, протекающего через светодиод, равные 1 мА, 2,5 мА, 5 мА, 10 мА, 15 мА, 20 мА, 25 мА. Измерить падение напряжения на светодиоде при данных значениях тока.

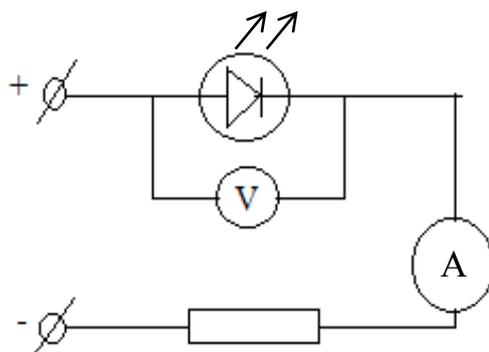


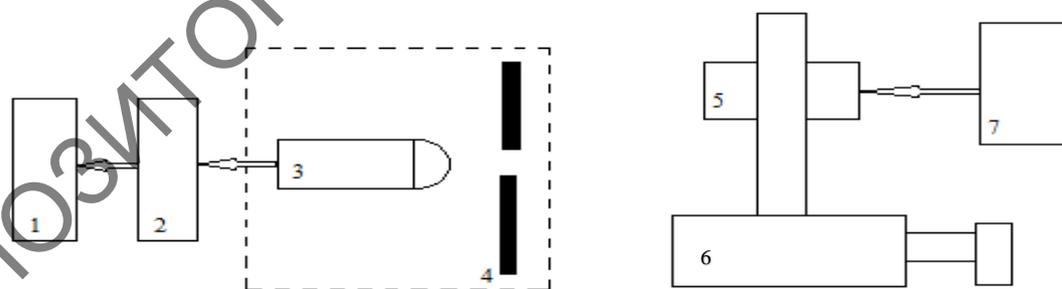
Рисунок 3.4 – Схема для измерения ВАХ светодиода

4. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Вольт-амперные характеристики светодиодов

Красный СИД, $\lambda = 660$ нм		Желтый СИД, $\lambda = 590$ нм		Зеленый СИД, $\lambda = 565$ нм	
I , мА	U , В	I , мА	U , В	I , мА	U , В

5. Для исследования индикатрисы направленности излучения светоизлучающих диодов необходимо использовать стенд, схема которого представлена на рисунке 3.5.



- 1 – измерительный прибор; 2 – усилитель; 3 – фотоприемник; 4 – диафрагма;
 5 – полупроводниковый светоизлучающий диод; 6 – поворотная платформа;
 7 – источник питания СИД

Рисунок 3.5 – Стенд для измерения индикатрисы направленности излучения СИД

6. Включить источник питания СИД. Установить номинальный ток испытуемого СИД. Включить источник питания фотоприёмника.

7. Установить поворотный столик с СИД таким образом, чтобы оптические оси фотоприёмника и СИД примерно совпадали. Задавая шаг изменения угла поворота СИД равным 1 градусу, снять показания измерительного фотоприёмника в интервал от -90° до $+90^\circ$.

8. Отключить источники питания СИД и фотоприёмника. Заменить СИД. Повторить п. 6–8.

9. Результаты измерений по п. 7 занести в таблицу.

10. По полученным данным построить ВАХ светодиодов, а также индикатрисы направленности излучения исследованных СИД, используя усреднённые данные результатов измерений по п. 8.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой принцип работы и конструкции СИД?
2. Почему светодиод генерирует монохроматическое излучение?
3. Назовите основные параметры и характеристики СИД.
4. Укажите схемы включения СИД.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: изучение методов определения типа проводимости и диффузионной длины, а также биполярной подвижности и времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых образцах.

Оборудование: осциллограф, образец кремния, коммутатор с переключателями режима работы, генератор синхронных прямоугольных импульсов противоположных полярностей, фокусирующая линза, He-Ne-лазер, электромеханический модулятор излучения, регулируемый источник напряжения для модулятора, нерегулируемый источник напряжения.

Теоретические сведения

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 (рисунок 4.1).

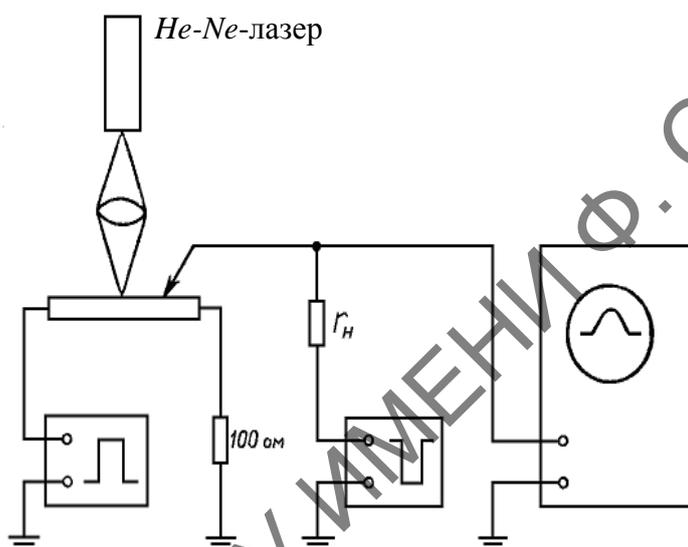


Рисунок 4.1 – Схема измерения биполярной подвижности (образец n -типа)

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 в том случае, 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:

$$V_{\text{др}} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \quad (4.1)$$

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

Чтобы найти биполярную подвижность, нужно помимо $V_{\text{др}}$ определить напряженность E тянущего поля.

$$\mu = \frac{V_{\text{др}}}{E}. \quad (4.2)$$

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 ко входу вертикального отклонения осциллографа (рисунок 4.2), предварительно откалиброванного по напряжению.

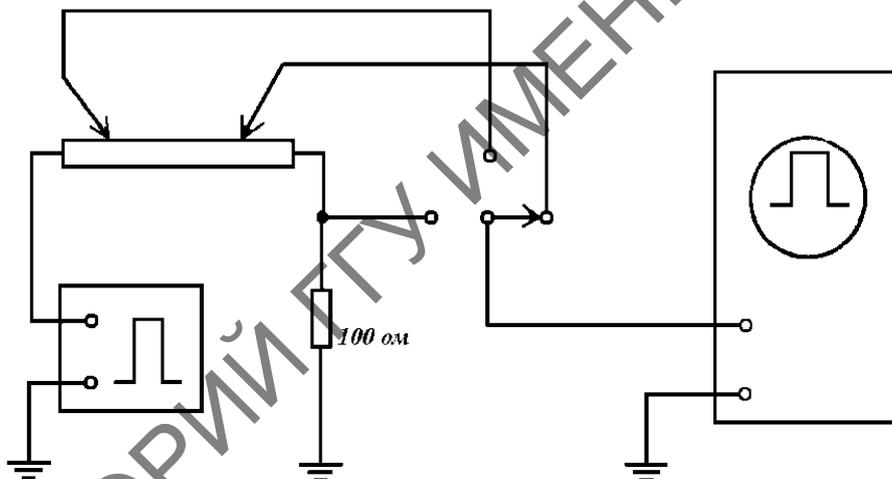


Рисунок 4.2 – Схема измерений поля и удельного сопротивления

Если l – расстояние между зондами, то напряженность поля

$$E = \frac{U_2 - U_1}{l}. \quad (4.3)$$

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

$$\rho = \frac{U_2 - U_1}{I} \cdot \frac{bd}{l}, \quad (4.4)$$

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 (рисунок 4.3). Включают мотор прерывателя лазерного пучка таким образом, что генерация неравновесных зарядов производится 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 (рисунок 4.3) служит для определения диффузионной длины L . Для этого измеряют амплитуду U импульсов напряжения на коллекторе (пропорциональных концентрации неравновесных пар δp) при различных положениях x полоски лазерного излучения на образце и строят график зависимости $\ln U$ от x . Величина углового коэффициента прямой, проведенной через экспериментальные

точки, $\left| \frac{\Delta x}{\Delta \ln U} \right| = L$.

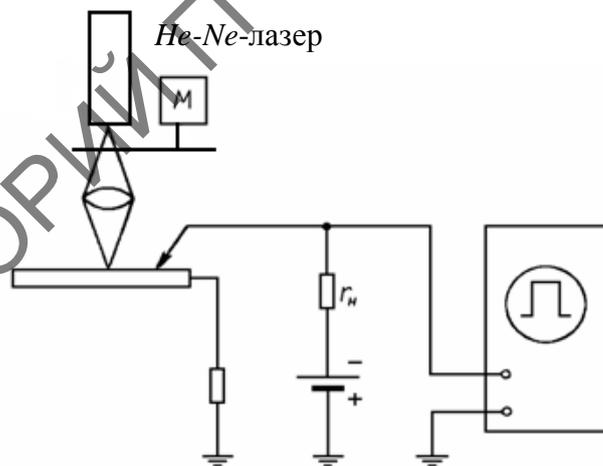


Рисунок 4.3 – Схема измерений диффузионной длины (образец n -типа)

Таким образом непосредственно определяется биполярная подвижность μ , диффузионная длина L неравновесных носителей заряда и удельное сопротивление ρ образца. Если удельное сопротивление ока-

зывается 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

$$\mu = \frac{n - p}{\frac{n}{\mu_p} + \frac{p}{\mu_n}} \quad (4.5)$$

практически совпадает по величине с подвижностью носителей заряда, являющихся неосновными (т. е. дырок в электронном и электронов в дырочном образцах). То же самое относится и к коэффициенту диффузии. Его вычисляют по соотношению Эйнштейна,

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}, \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}, \quad (4.6)$$

где k – постоянная Больцмана;
 q – абсолютная величина заряда электрона;
 D – коэффициент диффузии, характеризующий градиент концентрации;
 μ – подвижность зарядов во внешнем поле.

Можно из (4.7) найти время жизни неравновесных пар (также совпадающее со временем жизни неосновных носителей заряда).

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (4.7)$$

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 мкс, 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 пере-

ключения режима работы, оптическую систему с прерывателем лазерного пучка, трансформатор питания, мотор 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 рисунке 4.4). Левый переключатель «смещение на коллектор» устанавливается в одном из четырех положений:

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

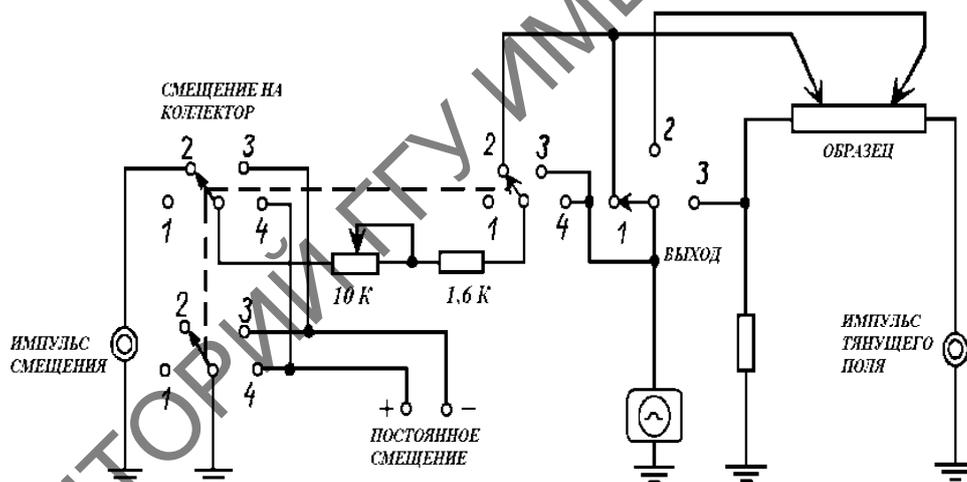


Рисунок 4.4 – Электрическая схема пульта переключателей

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 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.

Электронный осциллограф используется для наблюдения и измерения сигналов с зондов и включаемого последовательно с образцом сопротивления 100 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).

Порядок выполнения работы

Перед включением измерительного стенда следует измерить поперечные размеры образца, укрепить его в держателе и установить зонды на расстоянии 7–8 мм друг от друга. Дальнейшие действия выполняются в следующем порядке:

1. Поставить переключатель «Смещение на коллектор» на коммутаторе в положение «Имп.», а переключатель «Выход» – в положение «Лев.» (рисунки 4.1, 4.4).

2. Установить частоту повторения импульсов 100 Гц, длительность импульсов 20 мкс. Поставить переключатель рода работы осциллографа в положение «Ждущая развертка», переключатель «Синхронизация» – в положение «Внешняя», а переключатель «Длительность развертки» – 20 мкс.

3. Включить генератор импульсов и осциллограф.

4. 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.

5. Наблюдая на экране осциллографа за импульсом, снимаемым с левого коллектора, скомпенсировать его, повышая напряжение смещения.

6. Включить блок питания лазера, повернуть диск модулятора так, чтобы излучение падало 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.

7. 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. 4, 5, 7. По направлению тянущего поля и направлению дрейфа неравновесных носителей определить тип проводимости образца (электронный или дырочный).

8. Поставить ручку «Калибровка длительности» на панели осциллографа в положение «1 мкс». 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 $V_{др}$.

9. Уменьшить усиление канала вертикального отклонения осциллографа, включить метки времени, включить смещение на коллекторе и освещение образца. Стенд подготовлен для измерения напряжения (U_1) на левом зонде, обусловленного импульсом тянущего поля (рисунок 4.2).

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

11. 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.

12. Уменьшив амплитуду импульса тянущего поля приблизительно вдвое, повторить полностью измерения.

13. 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. мкс».

14. Включить лазер и мотор модулятора излучения. Схема подготовлена для измерения диффузионной длины ζ (рисунок 4.3).

15. 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 полоски лазерного излучения, отсчитываемого по индикатору перемещений. По наибольшей амплитуде импульсов определить положение x_1 левого зонда.

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

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

18. Вычислить для обоих значений тянущего поля его величину E , биполярную подвижность μ и удельное сопротивление ρ образца (соответственно, формулы (4.2)–(4.4)).

19. По величине ρ сделать заключение о том, обладает ли образец явно выраженной примесной проводимостью, или его проводимость близка к собственной.

20. Если проводимость образца примесная, рассчитать по соотношению Эйнштейна (4.6) коэффициент диффузии D_n или D_p неосновных носителей. Вычислить время жизни τ носителей по формуле (4.7).

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. Физические основы полупроводниковой фотозлектроники : учебное пособие / А. С. Войцеховский [и др.] – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 560 с.
2. Ажеганов, А. С. Квантовая и полупроводниковая электроника : учебное пособие / А. С. Ажеганов, И. Л. Вольхин, Н. К. Шестакова. – Пермь : Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2014. – 159 с.
3. Давыдов, В. Н. Физические основы оптоэлектроники : учебное пособие / В. Н. Давыдов. – Томск : ТУСУР, 2013. – 139 с.
4. Игнатов, А. Н. Оптоэлектроника и нанопотоника : учебное пособие / А. Н. Игнатов. – СПб. : Издательство «Лань», 2011. – 544 с.
5. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника / А. Н. Пихтин. – М. : «Высшая школа», 2001. – 573 с.
6. Мартынов, В. Н. Полупроводниковая оптоэлектроника / В. Н. Мартынов, Г. И. Кольцов. – М. : «МИСИС», 1995. – 400 с.
7. Носов, Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Радио и связь, 1985. – 360 с.
8. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Л. : «Машиностроение», 1982. – 240 с.
9. Носов, Ю. Р. Оптроны и их применение / Ю. Р. Носов, А. С. Сидоров. – М. : Радио и связь, 1981. – 280 с.
10. Быстров, Ю. А. Оптоэлектронные приборы и устройства / Ю. А. Быстров. – М. : издат. предприятие «Радио Софт», 2001. – 256 с.
11. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : «Беларусь», 2000. – 230 с.
12. Ребрин, Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве / Ю. К. Ребрин. – М. : «Советское радио», 1977. – 145 с.
13. Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов. – М. : «Высшая школа», 1971. – 180 с.
14. Абайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Абайдуллаев. – М. : Эко – Трендз, 2001. – 267 с.
15. Глаголев, С. Ф. Передаточные характеристики оптических волокон : учебное пособие / С. Ф. Глаголев, В. С. Иванов, Л. Н. Кочановский. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2001. – 79 с.

Производственно-практическое издание

**Максименко Александр Васильевич,
Мышковец Виктор Николаевич,
Баевич Георгий Александрович**

**ОПТОЭЛЕКТРОНИКА
МЕТОДЫ ПРИЕМА И ГЕНЕРАЦИИ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Практическое пособие

Редактор А. А. Негодина
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 10.02.2022. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 25 экз. Заказ 84.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ