

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы
контроля качества и диагностики состояния объектов»
дневной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2020

УДК 621.38:53
ББК 32.85:22.3
Ф50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «31» августа 2020 г., протокол № 1

Составители: ст. преподаватель В. В. Глущенко;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ляпин;
канд. физ.-мат. наук, доц. О. Е. Коваленко;
ст. преподаватель Е. В. Пивоварова;
д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. В. Шульга

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

В методических рекомендациях приводятся основы физики зонной теории проводимости твердых тел, полупроводниковых приборов, описание лабораторных установок, рассматривается принцип их действия, излагается порядок выполнения лабораторных работ по изучаемому курсу.

Учебно-методическое издание

ФИЗИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Часть 1

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	Е. А. Галковская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика».....	4
1 Лабораторная работа № 3.1. Исследование полупроводниковых диодов.....	5
2 Лабораторная работа № 3.2. Исследование биполярных транзисторов.....	11
3 Лабораторная работа № 3.3. Исследование характеристик светодиодов.....	21
4 Лабораторная работа № 3.4. Изучение температурной зависимости свойств металлов и полупроводников.....	32
Список литературы.....	40
Приложение А.....	42

Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика»

1 К работе в учебной лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда с соответствующей записью в протоколе проверки знаний по мерам безопасности.

2 В учебную лабораторию запрещено входить в верхней одежде.

3 Для работы приборов используется напряжение 220 В, представляющее опасность для жизни, что требует повышенного внимания и обязательного выполнения правил и норм охраны труда.

4 Перед началом проведения лабораторной работы студенту необходимо внимательно осмотреть приборы и оборудование на рабочем столе: нет ли механических повреждений, оголенных или оборванных проводов; проверить наличие заземления на приборах. О неисправностях сообщить преподавателю или лаборанту.

5 Электрическая схема студентом собирается при отключенных приборах и оборудовании от электрической сети. Собранную электрическую схему обязательно должен проверить преподаватель. Перед включением источника постоянного тока в сеть проверить, находятся ли их «регулировки выхода» в положении, соответствующем минимальному выходному напряжению.

6 Приступать к выполнению лабораторной работы можно только с разрешения преподавателя. После подключения к схеме источников напряжения никаких переключений в схеме не производить. Не прикасаться руками к точкам установки, которые могут оказаться под напряжением.

7 При проведении работы необходимо быть внимательным и при резких отклонениях в показаниях приборов, появлении характерного запаха, искрения нужно отключить приборы и сообщить преподавателю.

8 Не оставлять без присмотра приборы, устройства и оборудование, включенные в электрическую сеть.

9 В случае возгорания электрических проводов или приборов необходимо их немедленно обесточить и сообщить преподавателю или лаборанту.

10 При снятии температурных зависимостей следует соблюдать осторожность с термокамерой, температура которой может достигать 100 °С.

11 В случае поражения работающего электрическим током необходимо:

- немедленно отключить оборудование;
- освободить пострадавшего от токоведущих частей;
- уложить пострадавшего;
- проверить у пострадавшего наличие дыхания;
- убедиться в наличии пульса;
- при необходимости приступить к искусственному дыханию, вызвать

врача скорой помощи по тел. 103.

12 По окончании лабораторной работы необходимо отключить электрические приборы, навести порядок на своём рабочем месте.

1 Лабораторная работа № 3.1. Исследование полупроводниковых диодов

Цель работы: исследование вольт-амперных и частотных характеристик работы полупроводниковых диодов, а также общих принципов их использования в электронных цепях.

Общие сведения

Диод – двухэлектродный электронный прибор, обладающий эффектом выпрямления электрического тока. Полупроводниковый диод представляет двухслойный полупроводниковый прибор, в котором один слой имеет электропроводность n -типа, а другой – p (рисунок 1.1). Пограничная область между слоями называется электронно-дырочным p – n -переходом. Данный переход обладает выпрямляющими свойствами, т. е. проводит ток преимущественно в одном направлении.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p – n -перехода описывается выражением

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где I_0 – тепловой ток;

U – приложенное внешнее напряжение;

φ_T – тепловой потенциал (при нормальных условиях $\varphi_T = 26$ мВ).

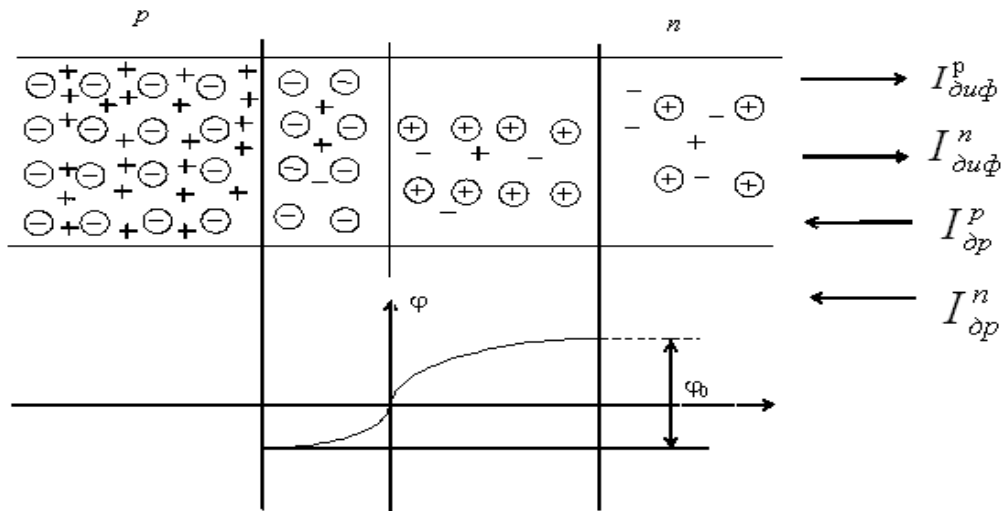


Рисунок 1.1 – Схематическое представление p – n -перехода и возникновение контактной разности потенциалов

Полупроводниковый диод представляет собой объединение p – n -перехода и омического сопротивления p - и n -областей (рисунок 1.2), поэтому ВАХ собст-

венно диода (рисунок 1.3) характеризуется экспоненциальной зависимостью на прямой ветви только на начальном участке. При достижении порогового напряжения U_{nop} (см. рисунок 1.3) $p-n$ -переход исчезает и зависимость между током и напряжением определяется величиной омического сопротивления $r_0 = r_p + r_n$.

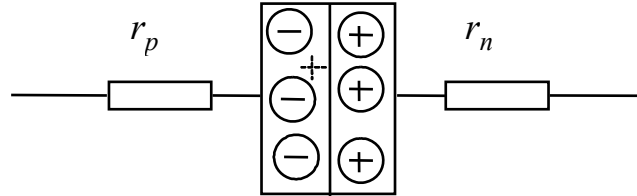


Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема $p-n$ -перехода

На обратном участке ВАХ превышение некоторого напряжения $U_{проб}$ создает состояние пробоя – необратимого неконтролируемого увеличения обратного тока, приводящего к выходу диода из строя. Известно несколько механизмов пробоя: туннельный, тепловой, лавинный и др.

Анализ процессов, происходящих в $p-n$ -переходе, показывает, что при изменении приложенного напряжения имеет место перераспределение заряда в области перехода, т. е. переход ведет себя аналогично ёмкости.

Изменение заряда обратным напряжением на электронно-дырочном переходе эквивалентно некоторой ёмкости, названной **барьерной**. Наличие данной ёмкости приводит к тому, что пульсация обратного напряжения вызывает соответствующие изменения обратного тока, по амплитуде намного превосходящие его стационарное значение.

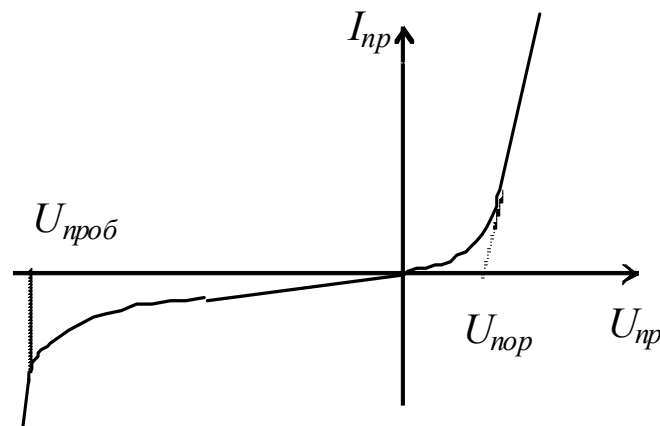


Рисунок 1.3 – Вольт-амперная характеристика реального $p-n$ -перехода

Диффузионной названа ёмкость, учитывающая накопление инжектированных неравновесных носителей заряда в области $p-n$ -перехода при приложении прямого напряжения. Смена напряжения на обратное обуславливает втягивание накопленных носителей назад, что приводит в момент переключения к относительно большому обратному току, уменьшающемуся по мере

рассасывания избыточной концентрации. Данный процесс также аналогичен перезарядке ёмкости. С учётом вышеизложенного эквивалентная схема диода имеет вид, представленный на рисунке 1.4. При постоянном токе основным параметром диода является его сопротивление, которое меняет свое значение в зависимости от полярности приложенного напряжения. Ёмкость C оказывает влияние на поведение диода на переменном сигнале.

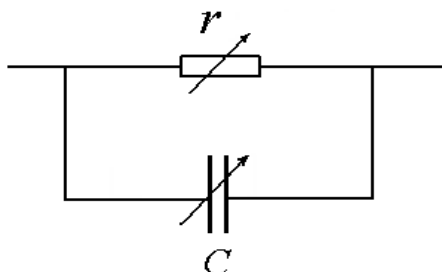


Рисунок 1.4 – Эквивалентная схема диода

Существует несколько десятков разновидностей диодов, которые классифицируются по технологии изготовления или функциональному назначению. Наиболее широко распространены *выпрямительные* диоды, предназначенные для преобразования знакопеременного напряжения в знакопостоянное в составе соответствующих схем. Простейшая схема такого выпрямителя представлена на рисунке 1.5.

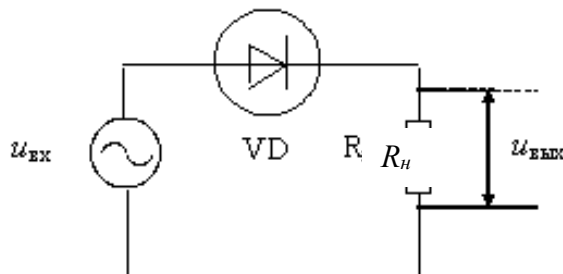


Рисунок 1.5 – Простейшая схема диодного выпрямителя

Выпрямительные диоды обычно реализуют выпрямление на низких (промышленных) частотах ω_1 (рисунок 1.6, *а*), составляющих десятки и сотни герц. На более высоких частотах начинает сказываться диффузионная ёмкость диода, что приводит к появлению выбросов обратного тока (рисунок 1.6, *б*).

При некотором значении частоты ω_4 диод полностью теряет свои выпрямительные свойства.

Выпрямительные диоды также находят применение для реализации ограничителей – электронных устройств формирования сигналов специальной формы [1]. В электронной технике широко используются специальные диоды, называемые *стабилитронами*, в которых состояние пробоя является рабочим, т. к. напряжение пробоя практически постоянно и может поддерживаться длительное время без выхода диода из строя при ограничении обратного тока.

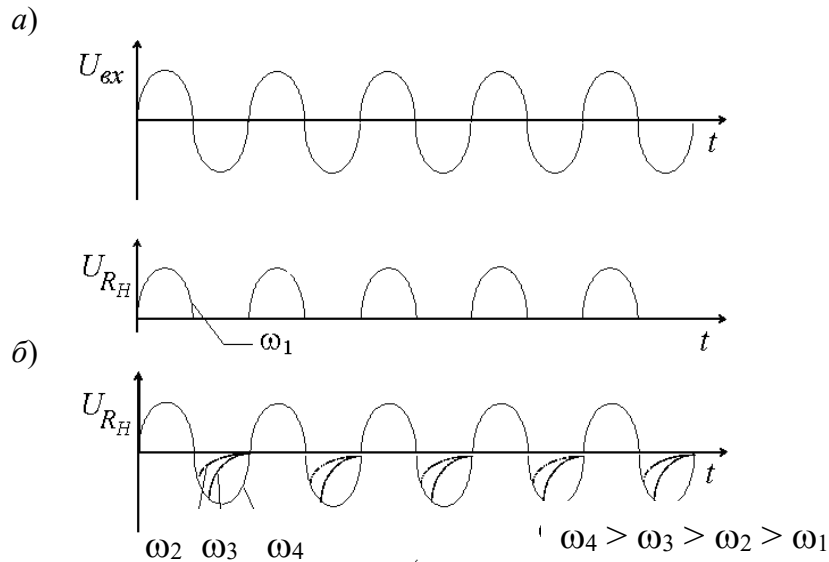


Рисунок 1.6 – Графическое представление работы выпрямителя на различных частотах входного сигнала

Работа стабилитрона основана на управляемом туннельном пробое полупроводника сильным обратным полем, не приводящим к его тепловому разрушению [1]. В отечественной технической литературе стабилитроны также известны как опорные диоды (диоды Зенера по англоязычной терминологии). Для стабилитрона основными рабочими параметрами являются напряжение стабилизации U_{cm} (рисунок 1.7), дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $r_{cm} = \Delta U_{cm} / \Delta I_{cm}$, минимальное и максимальные значения тока стабилизации $I_{cm \min}$, $I_{cm \max}$.

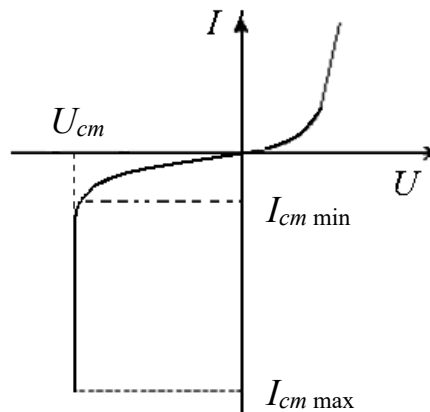


Рисунок 1.7 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Описание установки

Установка состоит из измерительного стенда, внешнего многопредельного вольтметра «V» и многопредельного миллиамперметра «mA». Принципиальная схема ее приведена на рисунке 1.8.

В состав стенда входят источник постоянного напряжения с регулятором постоянного напряжения «U», переключатель «ПВ-ОВ» (прямая ветвь – обрат-

ная ветвь), диод, подключенный к коммутационным гнездам.

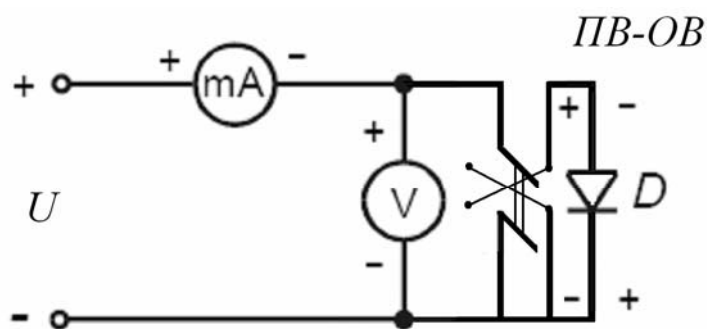


Рисунок 1.8 – Схема установки для снятия прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики диода

Внимание! Перед включением приборов в сеть убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, установлена в положение «0», что соответствует минимальному выходному напряжению.

Порядок выполнения работы

Снятие вольт-амперной характеристики диода.

1 Включить питание источника постоянного тока и при необходимости вольтметра и амперметра соответствующими тумблерами «Сеть», дать приборам прогреться в течение 5 мин.

2 Переключатель «±~» установить в положение «±», а переключатель «ПВ-ОВ» – в положение «ПВ» (прямая ветвь).

3 Увеличивая ступенями напряжение, подаваемое на схему от источника постоянного тока, снять зависимость между током I , текущим через переход, и напряжением U , действующим на нем, для диода.

На прямой ветви ток должен изменяться в пределах от 0 до 100 мА.

Увеличение значений силы тока и напряжения проводится перемещением ручки потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу. Количество измерений должно быть достаточным для точного построения нелинейных участков прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристики.

4 После измерений **ручку потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, установить в положение «0».**

5 Перевести переключатель «ПВ-ОВ» в положение «ОВ» (обратная ветвь).

6 Включить мультиметр для измерения силы тока обратной ветви («ОВ») нажатием кнопки или поворотом соответствующего переключателя. Убедиться, что указатель переключателя находится в секторе «А» на отметке 2000 мкА или 2 мА.

7 Снять обратные ветви вольт-амперных характеристик диода.

Ток должен изменяться в таких пределах, чтобы на обратной ветви был виден участок пробоя.

Увеличение значений силы тока и напряжения проводится перемещением

ручки потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу.

8 После измерений *ручку потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, установить в положение «0».*

Изучение частотных характеристик диодов.

9 Подключить вход осциллографа «У» к выходу генератора. Включить питание генератора и осциллографа соответствующими тумблерами «Сеть», дать приборам прогреться в течение 5 мин.

10 Установить с помощью регулятора частоты генератора частоту выходного сигнала 100 Гц при нажатой клавише «Х1» и амплитуде выходного сигнала 5 В.

11 Получить осциллограммы сигналов, соответствующие рисунку 1.6, а, для чего нажать кнопку «Авто». Зарисовать осциллограмму.

12 Переключатель «±~» установить в положение «~», а переключатель «ПВ-ОВ» – в положение «ПВ».

13 Подключить вход осциллографа «У» к клеммам переключателя «ПВ-ОВ».

14 Получить осциллограммы сигналов, соответствующие рисунку 1.6, а, для чего нажать кнопку «Авто». Зарисовать осциллограмму.

15 Увеличить частоту источника до значения, при котором диод начинает терять выпрямительные свойства (см. рисунок 1.6, б). Зарисовать осциллограмму и зафиксировать частоту.

16 Увеличить частоту источника до значения, при котором диод полностью теряет выпрямительные свойства. Зарисовать осциллограмму и зафиксировать частоту.

Содержание отчета

1 Схемы исследуемых электронных цепей.

2 ВАХ выпрямительного диода и стабилитрона.

3 Зафиксированные осциллограммы экспериментов.

4 Значение $U_{пор}$, определенное путём проведения касательной (см. рисунок 1.3) при комнатной температуре.

5 Рассчитанное дифференциальное сопротивление диода $r = \Delta U / \Delta I$.

6 Выделенные на осциллограмме выходного напряжения ограничителя участки, когда диод закрыт.

7 Значения частот, при которых выпрямительный диод начинает терять выпрямительные свойства и полностью теряет данные свойства.

8 Определённые по ВАХ U_{cm} и r_{cm} .

9 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Чем объясняются выпрямительные свойства диода?

2 Почему диод теряет выпрямительные свойства?

3 Почему диод является температурно-зависимым элементом?

4 Какая ёмкость диода больше по величине?

5 Почему наблюдаются колебания обратного тока диода при изменении обратного напряжения?

2 Лабораторная работа № 3.2. Исследование биполярных транзисторов

Цель работы: практическое определение основных параметров биполярного транзистора. Закрепление знаний по принципам работы полупроводниковых приборов.

Общие сведения

Одно из самых важных технических применений полупроводников, которое существенно стимулировало развитие современной радиоэлектроники, заключается в их использовании для усиления и генерации электрических колебаний. Приборы, предназначенные для этих целей, получили общее название «транзисторы» (от двух английских слов: transfer – переносить, преобразовывать и resistor – сопротивление).

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Работа биполярного транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда обоих знаков – электронов и дырок, вследствие чего и возникло такое название. В общем случае транзистор состоит из полупроводниковой пластины, в которой путем надлежащего распределения примесей созданы два близко расположенных $p-n$ -перехода. Область между двумя переходами принято называть базой транзистора, а внешние области – эмиттером (emit – с английского означает испускать) и, соответственно, коллектором. Такую систему из двух переходов можно осуществить двумя способами: создавая у эмиттера и коллектора дырочную проводимость, а у базы – электронную, т. е. структуру типа $p-n-p$ (рисунок 2.1), либо наоборот – $n-p-n$. Физические процессы в обоих случаях совершенно аналогичны, и поэтому в дальнейшем для определенности будем говорить о $p-n-p$ -структуре. Для разъяснения принципа действия транзистора рассмотрим одну из возможных схем его включения (см. рисунок 2.1), в которой базовый электрод является общим для обеих цепей – эмиттера и коллектора (схема с общей базой). Токи будем считать постоянными или изменяющимися медленно. Один из $p-n$ -переходов (эмиттерный) включается в прямом направлении и инжектирует в базу дырки; второй $p-n$ -переход (коллекторный) включается в обратном направлении и собирает инжектированные эмиттером дырки.

Если толщина базы (расстояние между границами эмиттерного и коллекторного $p-n$ -переходов) $W < L_p$, где L_p – длина диффузии дырок в базе, то значительная часть инжектированных дырок (рисунок 2.2) не успеет реком-

бинировать в области базы и дойдет до коллекторного перехода.

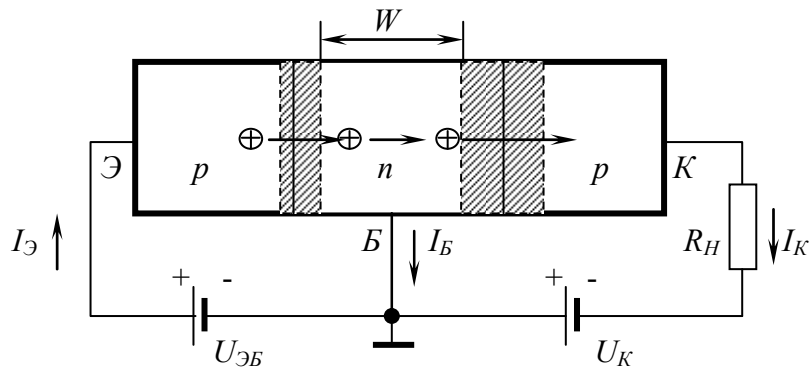


Рисунок 2.1 – Структура p - n - p -транзистора в схеме с общей базой в активном режиме (области эмиттерного и коллекторного p - n -переходов заштрихованы)

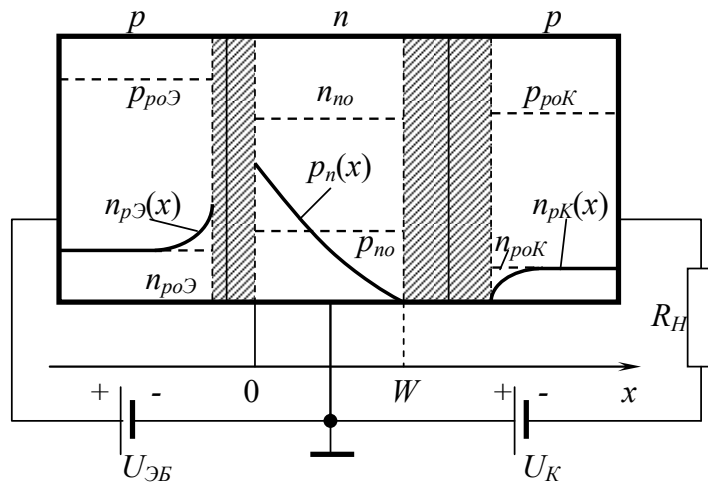
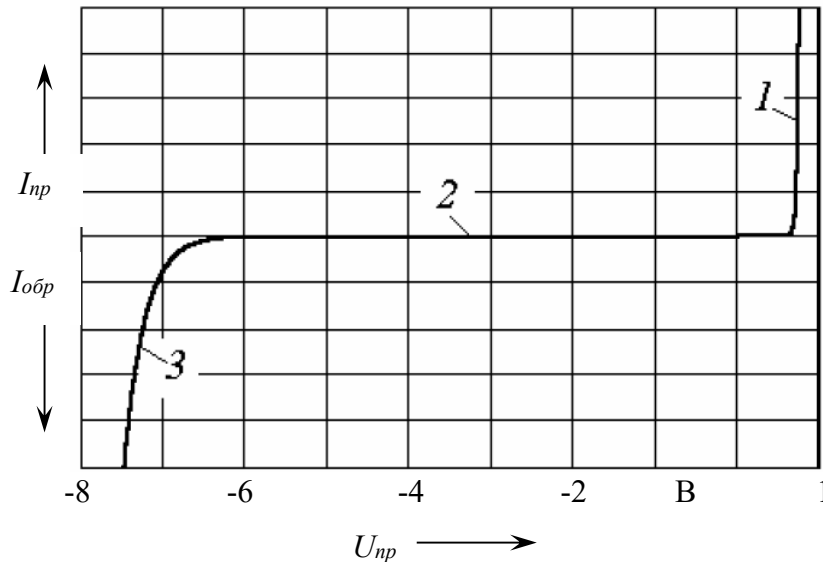


Рисунок 2.2 – Распределение концентраций неосновных носителей заряда в транзисторе в активном режиме

Так как к коллектору приложено большое обратное напряжение (потенциал коллектора отрицателен относительно базы), то в коллекторном переходе существует сильное электрическое поле, затягивающее дошедшие до коллекторного перехода дырки в коллекторную область. Таким образом, все дырки, достигающие коллекторного перехода, будут входить в область коллектора и участвовать в образовании тока в цепи коллектора. Эти две цепи оказываются связанными друг с другом с помощью инжектированных дырок, так что всякое изменение тока в цепи эмиттера вызывает определенное изменение тока в цепи коллектора. Транзисторный эффект описанного типа был открыт в 1948 г. Дж. Бардиным, В. Браттейном и В. Шокли.

Наиболее полно статические параметры биполярного транзистора описываются входной вольт-амперной характеристикой и семейством выходных характеристик. Входная ВАХ транзистора $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ почти не зависит от напряжения «коллектор–эмиттер» и повторяет ВАХ p - n -перехода (рисунок 2.3).



1 – проводящее состояние перехода (переход открыт); 2 – непроводящее состояние перехода (переход закрыт); 3 – участок электрического пробоя

Рисунок 2.3 – ВАХ p - n -перехода

Выходные характеристики транзистора $I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_B = \text{const}$ приведены на рисунке 2.4. На семействе выходных характеристик транзистора можно выделить три зоны: 1 – зона насыщения, в которой транзистор полностью открыт и его напряжение «коллектор–эмиттер» минимально; 2 – активная зона, в которой ток коллектора пропорционален току базы; 3 – зона отсечки, когда транзистор полностью закрыт, а его коллекторный ток минимален.

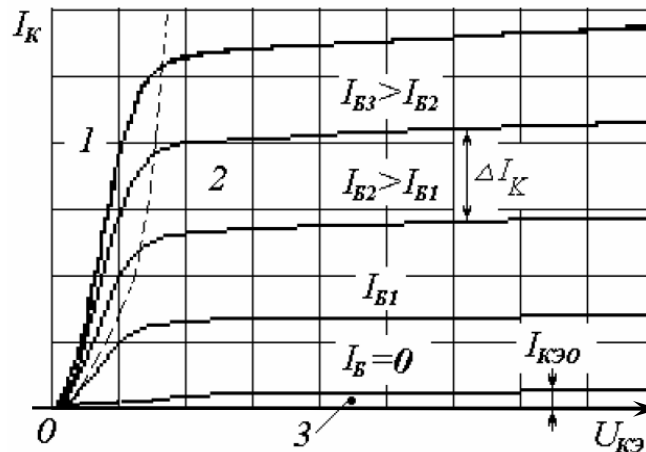


Рисунок 2.4 – Выходные характеристики биполярного транзистора

Так как характеристики биполярных транзисторов нелинейные, то при аналитических расчетах используются дифференциальные параметры, которые определяются как производные в конкретных точках характеристик. Рисунок 2.5 иллюстрирует методику определения дифференциального сопротивления транзистора, которое вычисляют по его входной ВАХ как отношение

приращения напряжения к приращению тока для касательной, проведенной через точку A , в которой определяется это сопротивление.

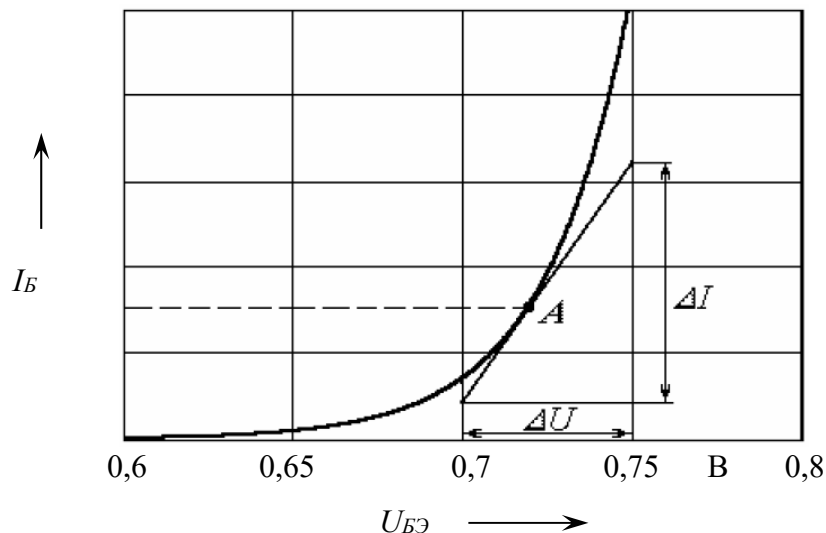


Рисунок 2.5 – Методика определения входного сопротивления транзистора

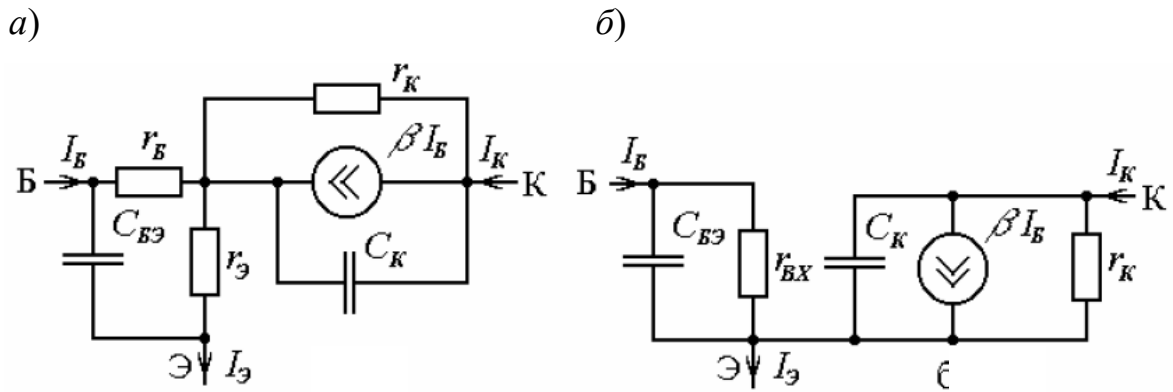
Входное дифференциальное сопротивление транзистора

$$r_{BX} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}. \quad (2.1)$$

Из рисунка 2.4 видно, что в активной зоне транзистор ведет себя как источник тока, управляемый базовым током, поэтому основным параметром транзистора является коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером

$$\beta = h_{21Э} = \frac{dI_K}{dI_B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}. \quad (2.2)$$

Определение ΔI_K иллюстрируется на рисунке 2.4, а $\Delta I_B = I_{B3} - I_{B2}$. В общем случае β зависит от тока коллектора и температуры перехода. При аналитических расчетах широко применяют схемы замещения транзистора, которые описывают транзистор линейной схемой и справедливы для сравнительно небольших изменений токов и напряжений. Полная и упрощенная схемы замещения биполярного транзистора (БТ) приведены на рисунке 2.6. При этом на рисунке приняты следующие обозначения: r_K , r_B , $r_Э$ – коллекторное, базовое и эмиттерное дифференциальные сопротивления транзистора; C_K , $C_{БЭ}$ – емкости переходов «коллектор–база» и «база–эмиттер», $r_{BX} = r_B + (1 + \beta) \cdot r_Э$ – дифференциальное входное сопротивление. Для сопротивлений выполняется соотношение $r_K \gg r_B > r_Э$, поэтому эмиттерное сопротивление в выходной цепи схемы замещения транзистора на рисунке 2.6, b не учитывается.



a – полная схема; *б* – упрощенная схема

Рисунок 2.6 – Схемы замещения транзистора

В первом приближении работа транзистора может быть описана следующим образом. Под действием напряжений, приложенных к эмиттерному $u_{ЭП}$ и коллекторному $u_{КП}$ переходам, через них протекают токи i_1 и i_2 , рассчитываемые с использованием выражений, описывающих ВАХ полупроводникового диода:

$$i_1 = I_{ЭБК} \left(e^{\frac{u_{ЭП}}{u_T}} - 1 \right); \quad (2.3)$$

$$i_2 = I_{КБК} \left(e^{\frac{u_{КП}}{u_T}} - 1 \right), \quad (2.4)$$

где $I_{ЭБК}$ – тепловой ток эмиттерного перехода при замыкании выводов коллектора и базы ($u_{КП} = 0$);

$I_{КБК}$ – тепловой ток коллекторного перехода при замыкании вывода эмиттера и баз ($u_{ЭП} = 0$).

Напряжения на переходах считаются положительными, если они прямые. Для $n-p-n$ -транзистора

$$u_{ЭП} = u_{БЭ} = -u_{ЭБ};$$

$$u_{КП} = u_{БК} = -u_{КБ}.$$

Использование напряжений на переходах позволяет описывать $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы одинаковыми формулами.

Взаимодействие близко расположенных переходов приводит к тому, что ток i_1 с коэффициентом $\alpha \approx 0,97 \dots 0,999$ передается в коллекторный переход. Таким образом, основная часть тока i_1 протекает через цепь коллектора (αi_1) и только малая часть $(1 - \alpha)i_1$ – через цепь базы. Аналогично ток i_2 с коэффициентом α_1 передается в цепь эмиттера.

Эквивалентная схема транзистора, построенная в рамках классической модели Эберса-Молла в соответствии с вышеизложенным, приведена на рисунке 2.7.

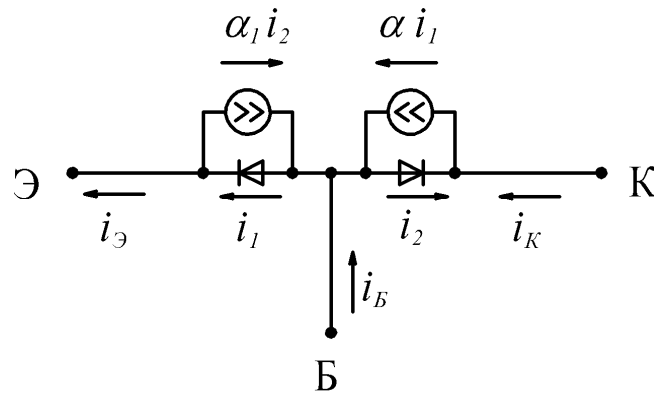


Рисунок 2.7 – Эквивалентная схема транзистора

В соответствии с выбранными положительными направлениями токов на схеме (см. рисунок 2.7) можно записать уравнения Эберса-Молла:

$$\begin{cases} i_{\text{Э}} = i_1 - \alpha_1 i_2; \\ i_{\text{К}} = \alpha i_1 - i_2, \end{cases} \quad (2.5)$$

в которых токи i_1 и i_2 рассчитываются по формулам (2.3) и (2.4).

В реальных транзисторах стремятся улучшить передачу тока от эмиттера к коллектору, и поэтому $\alpha > \alpha_1$. Можно показать, что четыре параметра модели Эберса-Молла связаны между собой соотношением

$$\alpha I_{\text{ЭБК}} = \alpha_1 I_{\text{КБК}}. \quad (2.6)$$

Порядок выполнения работы

Снятие вольт-амперных характеристик $n-p-n$ -перехода.

1 На монтажной плате собрать схему согласно рисунку 2.8. В этой схеме напряжение $U_{\text{эб}}$ измеряется, ток $i_{\text{э}} = (E_1 - U_{\text{эб}})/R_1$, ток $i_{\text{к}}$ измеряется, $U_{\text{кб}} = E_2$.

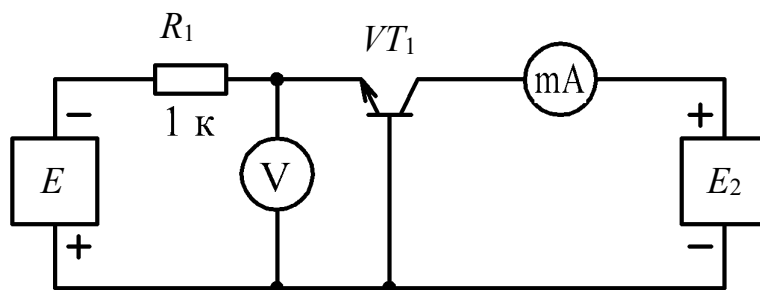


Рисунок 2.8 – Схема установки для измерения токов коллектора и эмиттера со смещением коллекторного перехода в обратном направлении (активный режим работы транзистора)

2 Снять входные статические характеристики $n-p-n$ -перехода транзистора.

2.1 Включить питание предварительно настроенных приборов: вольтметра

и миллиамперметра.

2.2 Включить питание двухканального прибора GW Instek GPS-72303, нажав кнопки Power и Output.

2.3 Вращая регуляторы напряжения каналов (слева – канала E_1 , справа – канала E_2), измерить значение $U_{эб}$ и рассчитать $i_э$, изменяя эмиттерное напряжение E_1 при отсутствующем коллекторном напряжении ($E_2 = 0$ В) и при $E_2 = 3$ В и $E_2 = 7$ В.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость тока эмиттера $I_э$ от напряжения на эмиттерном переходе при значениях постоянного напряжения на коллекторном переходе

$E_2, В$	$E_1, В$	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
0	$U_{эп}, В$								
	$i_э, мА$								
3	$U_{эп}, В$								
	$i_э, мА$								
7	$U_{эп}, В$								
	$i_э, мА$								

2.4 Построить семейство графиков ВАХ $i_э = f(U_{эб})$ эмиттерного перехода транзистора.

3 Снять выходные статические характеристики $n-p-n$ -перехода транзистора.

3.1 Включить питание приборов.

3.2 Вращая регуляторы напряжения каналов блока питания, измерить значение $i_к$, изменяя коллекторное напряжение E_2 при отсутствующем эмиттерном напряжении ($E_1 = 0$ В) и при $E_1 = 3$ В и $E_1 = 7$ В. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость тока коллектора $i_к$ от напряжения на коллекторном переходе при значениях постоянного напряжения на эмиттерном переходе

$E_1, В$	$E_2, В$	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
0	$i_к, мА$								
3	$i_к, мА$								
7	$i_к, мА$								

3.3 Выключить приборы, установив ручки регулятора напряжений на 0, и отсоединить приборы от сети.

3.4 Построить семейство графиков ВАХ $i_к = f(U_{кб})$ коллекторного перехода транзистора.

Измерение прямых и инверсных коэффициентов передачи токов.

1 Измерение прямых коэффициентов передачи токов α и β .

1.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 2.9.

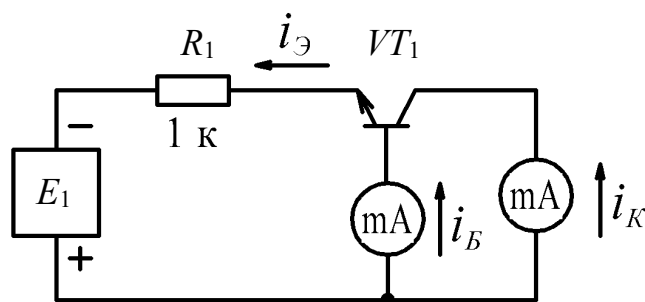


Рисунок 2.9 – Схема установки для измерения прямых коэффициентов передачи токов α и β

1.2 Включить приборы и блок питания. Изменяя напряжение на источнике питания E_1 , установить последовательно ток коллектора $i_K = 1, 3, 5, 7$ и 9 мА и измерить соответствующие значения тока базы i_B .

1.3 Рассчитать величины $i_Э = i_K + i_B$, $\alpha = i_K/i_Э$, $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$. Результаты измерений занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты измерений и расчета прямых коэффициентов передачи токов α и β

Измерение		Расчет		
i_K	i_B	$i_Э$	α	β

1.4 Построить графики зависимостей $\alpha = f(i_Э)$, $\beta = f(i_Э)$.

2 Измерение инверсных коэффициентов передачи токов α_1 и β_1 .

Для измерения инверсных коэффициентов передачи повторить измерения и расчеты по п. 1, поменяв местами эмиттер и коллектор транзистора на схеме, приведенной на рисунке 2.9. Зарисовать получившуюся схему измерений. Результаты измерений занести в таблицу 2.4. Построить зависимости $\alpha_1, \beta_1 = f(i_K)$.

Таблица 2.4 – Результаты измерений и расчета инверсных коэффициентов передачи токов α_1 и β_1

Измерение		Расчет		
$i_Э$	i_B	i_K	α_1	β_1

Выключить приборы, установив ручки регулятора напряжений на «0», и отсоединить приборы от сети.

Измерение теплового тока транзистора.

1 Измерение теплового тока эмиттерного перехода $I_{ЭБК}$.

1.1 На монтажной плате собрать схему, приведенную на рисунке 2.10. В этой схеме напряжения $u_{эб}$ и $u_{кб}$ измеряются; токи $i_э$ и $i_к$ рассчитываются по формулам: $i_э = (E_1 - u_{эб})/R_1$; $i_к = (E_2 - u_{кб})/R_2$.

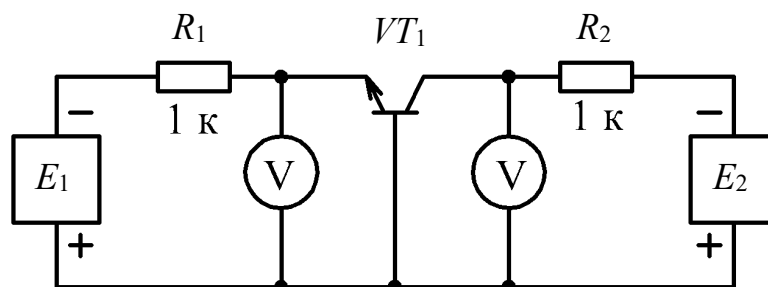


Рисунок 2.10 – Схема установки для измерения токов коллектора и эмиттера

1.2 Включить измерительные приборы и блок питания в сеть.

1.3 Определить ток $I_{эбк}$ при $E_2 = 0$ В из условия, что ток перехода $i_э$, измеренный и рассчитанный по формуле (2.7), совпадает при $i_э = 500$ мкА. Это достигается, если

$$I_{эбк} \left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi_T}} - 1 \right) = 500 \text{ мкА}, \quad (2.7)$$

где $U_{эб}$ – измеренное напряжение при $i_э = 500$ мкА ($E_1 \approx 0,7$ В);

φ_T – тепловой потенциал, $\varphi_T = 0,026$ В.

2 Измерение теплового тока коллекторного перехода $I_{кбк}$.

2.1 Определить ток $I_{кбк}$ при $E_1 = 0$ В по формуле (2.8), $E_2 \approx 0,7$ В.

$$I_{кбк} \left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi_T}} - 1 \right) = 500 \text{ мкА}, \quad (2.8)$$

где $U_{кб}$ – измеренное напряжение при $i_к = 500$ мкА.

2.2 Проверить, выполняется ли соотношение $\alpha I_{эбк} = \alpha_1 I_{кбк}$.

Экспериментальная проверка расчетного эмиттерного тока $i_э$ и коллекторного тока $i_к$ на основе уравнения Эберса-Молла.

1 В указанной преподавателем рабочей точке ($U_{эб}$ и $U_{кб}$), используя уравнение Эберса-Молла и формулы (2.3) и (2.4), рассчитать ток эмиттера $i_э$ и коллектора $i_к$ транзистора. Проверить расчеты экспериментально, используя схему, приведенную на рисунке 2.10. Результаты расчетов и измерений занести в таблицу 2.5.

2 Выключить блок питания, отключить приборы от сети.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов и измерений эмиттерного тока $i_э$ и коллекторного тока $i_к$ на основе уравнения Эберса-Молла

Измерено		При $E_2 = 0$ В			При $E_1 = 0$ В		
		Задано	Расчет	Измерено	Задано	Расчет	Измерено
		$U_{эб},$ В	$i_э,$ мА	$i_э,$ мА	$U_{кб},$ В	$i_к,$ мА	$i_к,$ мА
$E_1,$ В					–	–	–
$E_2,$ В		–	–	–			

Примечание – Подбор коллекторного и эмиттерного напряжения осуществляется в следующих диапазонах: $0,170 < U_{эб} < 0,230$ В; $0,170 < U_{кб} < 0,250$ В. Значения токов $i_э$ и $i_к$ вычисляются по формулам, приведенным в пояснении к рисунку 2.10 (п. 1.1 перед рисунком 2.10)

Содержание отчета

- 1 Схемы измерений.
- 2 Таблицы и графики.
- 3 Результаты расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Конструкция и типы транзисторов.
- 2 Поясните принцип действия биполярного транзистора.
- 3 Из каких компонентов состоят токи через эмиттерный и коллекторный переходы транзистора?
- 4 Записать и пояснить уравнения Эберса-Молла.
- 5 Объяснить принцип работы БТ в усилительном режиме.
- 6 Вид входной характеристики транзистора.
- 7 Вид выходной характеристики транзистора.
- 8 Принцип определения дифференциальных параметров.
- 9 Факторы, влияющие на параметры работы транзистора.

3 Лабораторная работа № 3.3. Исследование характеристик светодиодов

Цель работы: исследование характеристик различных типов светодиодов (СИД).

Общие сведения

Физические основы работы светоизлучающих диодов. В светодиодах генерация оптического излучения обеспечивается с помощью электролюминесценции (рисунок 3.1). Различают два ее вида:

- 1) инжекционная электролюминесценция, которая возникает в $p-n$ -переходе, находящемся под прямым напряжением;
- 2) предпробойная электролюминесценция, которая развивается в сильных полях, близких к тем, при которых появляется электрический пробой $p-n$ -перехода.

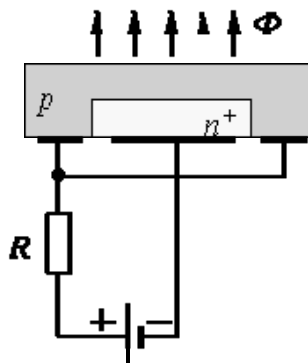


Рисунок 3.1 – Электролюминесценция $p-n$ -перехода

Инжекционная электролюминесценция объединяет в себе два процесса: инжекцию (проникновение) носителей и собственно электролюминесценцию. Инжекция необходима для создания неравновесных носителей заряда.

При наличии контакта однородных полупроводников с разными типами электропроводности в области перехода происходит искривление энергетических зон и образование потенциального барьера. В результате этого энергетические уровни носителей заряда в $p-n^+$ -переходе выглядят так, как показано на рисунке 3.2. Обозначение n^+ указывает, что область n -типа имеет более высокую степень легирования, чем область p -типа. Возникающая внутренняя разность потенциалов называется диффузионным потенциалом, который препятствует диффузии основных носителей. Внешнее напряжение понижает потенциальный барьер на границе p - и n^+ -областей и создает условия для инжекции (введения) электронов в p -область и дырок в n^+ -область.

Обычно излучающей является область только по одну сторону $p-n^+$ -перехода. Желательно, чтобы количество инжектированных носителей было максимально именно в активной (излучающей) p -области. С этой целью в n^+ -область вводят больше донорной примеси, чем акцепторной в p -область. Слаболеги-

рованная p -область, имеющая высокое сопротивление, называется базой. Сильнолегированная n^+ -область, называемая эмиттером, имеет низкое сопротивление и обозначается n^+ . Таким образом, в излучающей структуре инжекция практически односторонняя – из эмиттера в базу – и излучение света происходит из области базы. Рекомбинация электронов с зарядом q и дырок происходит как в области объемного заряда (рисунок 3.3, переход 2), так и по обе стороны от этой области на расстоянии диффузионных длин электронов в p -области и дырок в n^+ -области (см. рисунок 3.3, переходы 1 и 3).

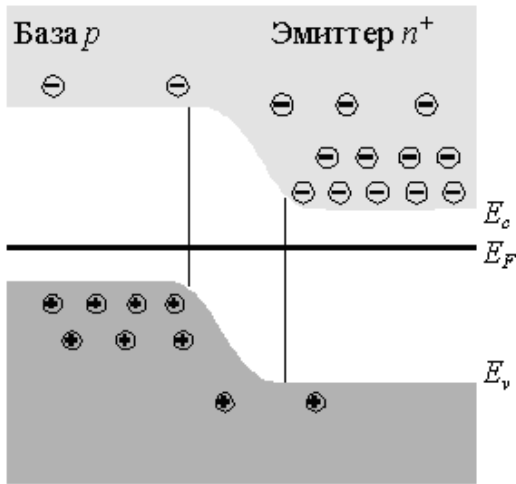


Рисунок 3.2 – Энергетические уровни p - n^+ -перехода в равновесии

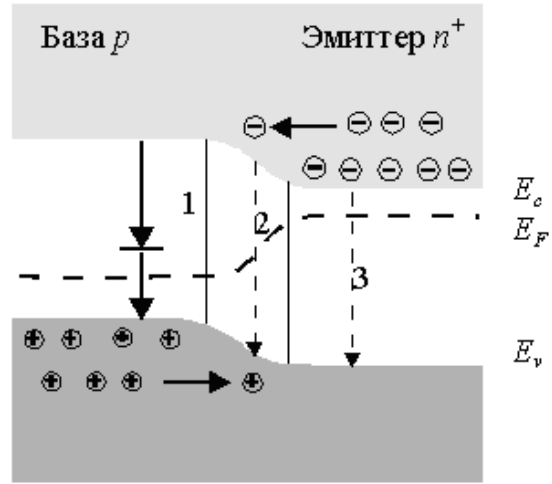


Рисунок 3.3 – Рекомбинация электронов и дырок в p - n^+ -переходе, включенном в прямом направлении

По мере повышения прямого напряжения U ток I через переход экспоненциально возрастает и при $qU \gg kT$ определяется выражением

$$I = I_n \exp\left(\frac{qU}{kT}\right), \quad (3.1)$$

где I_n – ток насыщения;

q – заряд электрона;

T – абсолютная температура;

k – постоянная Больцмана.

Общее число рекомбинаций в единицу времени зависит от силы тока, но только часть этих рекомбинационных процессов происходит с испусканием фотона. Поэтому поток излучения Φ , определяемый числом фотонов, испускаемых за 1 с, составляет

$$\Phi = \eta_k \frac{I}{q} = \frac{I}{q} \eta_k \exp\left(\frac{qU}{kT}\right), \quad (3.2)$$

где η_k – внутренний квантовый выход, который определяется как отношение

числа фотонов, излученных в единицу времени в активном слое p - n -перехода, к числу актов рекомбинации.

«Полезной» компонентой тока, обеспечивающей излучательную рекомбинацию в p -базе, является электронный ток I_n , инжектируемый эмиттером. Эффективность инжекции определяется тем, насколько ток I_n отличается от полного тока I и характеризуется коэффициентом инжекции

$$\gamma = \frac{I_n}{I} = \frac{I_n}{I_n + I_p + I_{рек} + I_{нов} + I_{тун}}, \quad (3.3)$$

где I_p – дырочная составляющая тока, обусловленная инжекцией дырок в n -эмиттер;

$I_{рек}$ – ток безызлучательной рекомбинации в области p - n -перехода;

$I_{тун}$ – туннельный ток, обусловленный «просачиванием» носителей через потенциальный барьер;

$I_{нов}$ – ток утечки по поверхности p - n -перехода.

Если коэффициент инжекции $\gamma = 1$, электронный ток равен полному ($I_n = I$) и все инжектируемые электроны участвуют в создании излучения в кристалле. Инжектированные в p -базу электроны рекомбинируют там вблизи p - n -перехода. При этом наряду с рекомбинацией, которая приводит к генерации оптического излучения (см. рисунок 3.3, переход 1 через центр рекомбинации), существуют механизмы безызлучательной рекомбинации (см. рисунок 3.3, переходы 2 и 3).

К важнейшим из них относятся:

– рекомбинация на глубоких центрах люминесценции. В этом случае энергия рекомбинации частично выделяется в виде длинноволновых фотонов, частично переходит в тепловые колебания решетки (фононы). В качестве таких центров выступают примеси и структурные дефекты;

– ударная или Оже-рекомбинация. При очень высоких концентрациях свободных носителей заряда в полупроводнике увеличивается вероятность столкновения трех частиц (например, двух электронов и дырки). Энергия рекомбинирующей электронно-дырочной пары при этом отдается третьему свободному носителю в форме кинетической энергии, которая постепенно теряется при соударении с кристаллической решеткой.

При низких напряжениях и токе преобладает рекомбинация в области пространственного заряда, где вероятность излучательных переходов в нужной спектральной области мала, поэтому при повышении напряжения и тока γ и η_k сначала возрастают, а затем становятся примерно постоянными (рисунок 3.4). При очень больших U и I возможно уменьшение η_k из-за увеличения числа безызлучательных процессов Оже-рекомбинации, а иногда и в результате повышения температуры кристалла. Существование зависимости $\eta_k(I)$ приводит к тому, что зависимость $\Phi(I)$ является линейной только в области средних

токов, когда $\eta_k \approx \text{const}$. В области низких токов Φ и яркость L растут с повышением I сверхлинейно, а в области больших I – сублинейно (рисунок 3.5).

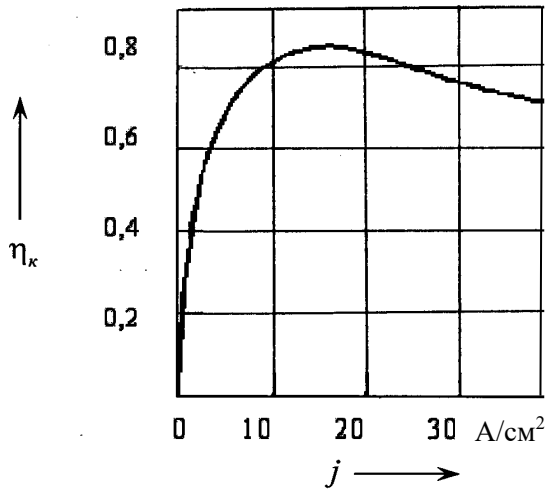


Рисунок 3.4 – Зависимость внутреннего квантового выхода от плотности прямого тока

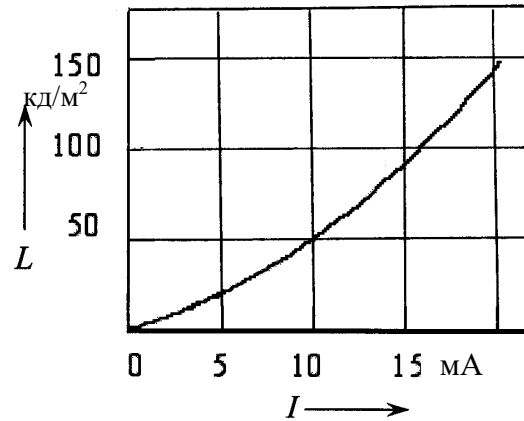


Рисунок 3.5 – Зависимость яркости GaAs-светодиода от прямого тока

Основные характеристики и параметры светодиодов. Основными параметрами промышленных светоизлучающих диодов являются:

– сила света I_{cv} – излучаемый диодом световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Указывается при заданном значении прямого тока и измеряется в канделах (люмен на стерадиан);

– яркость L – величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности. Измеряется в канделах на квадратный метр при заданном значении прямого тока через диод;

– постоянное прямое напряжение U_{np} – значение напряжения на светодиоде при протекании через него постоянного прямого тока;

– максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{np \max}$ – максимальное значение прямого тока, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода;

– максимально допустимое обратное постоянное напряжение $U_{обр \max}$ – максимальное значение постоянного обратного напряжения, приложенного к диоду, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

– максимально допустимое обратное импульсное напряжение $U_{обр \text{имп} \max}$ – максимальное пиковое значение обратного напряжения на светодиоде, включая как однократные выбросы, так и периодически повторяющиеся;

– максимум спектрального распределения λ_{\max} – длина волны светового излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения светодиода;

– ширина спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ – интервалов длин волн, в котором мощность СИД составляет половину максимальной;

– время нарастания излучения $t_{нр.изл}$ – интервал времени в момент включения, в течение которого мощность излучения диода изменяется от 0,1 до 0,9 своего максимального значения;

– время спада излучения $t_{сп.изл}$ – интервал времени в момент выключения, в течение которого мощность излучения диода изменяется от 0,9 до 0,1 своего максимального значения.

Основными характеристиками светодиода как источника света являются:

– яркостная характеристика – зависимость яркости от прямого тока, т. е. $L = f(I_{нр})$;

– световая характеристика – зависимость силы света от прямого тока, т. е. $I_{св} = f(I_{нр})$. При малых токах и, соответственно, малых напряжениях на светоизлучающем диоде процесс излучения протекает неактивно, поэтому начальный участок яркостной (световой) характеристики нелинейный. При больших токах яркостная характеристика почти линейна. Часто зависимость яркости или силы света от прямого тока выражается в относительных единицах и показывает, насколько снижается или увеличивается яркость данного прибора при изменении тока через диод;

– спектральная характеристика – зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света (дает представление о цвете свечения прибора (рисунок 3.6));

– диаграмма направленности – показывает распределение силы света в зависимости от угла, под которым ведется наблюдение излучения (определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала). Излучение светодиода может быть узконаправленным или рассеянным (рисунок 3.7);

– вольт-амперная характеристика – зависимость прямого тока от напряжения $L = f(I_{нр})$. Аналогична характеристике обычного выпрямительного диода, но из-за большей ширины запрещенной зоны, чем у кремния, сдвинута вправо, т. е. при одинаковом токе падения напряжения больше. Нижний предел рабочего напряжения определяется энергией излучаемых квантов света и численно равен 2,5...3,5 В (рисунок 3.8), верхний определяется допустимой мощностью рассеянного света;

– излучательная характеристика – зависимость мощности излучения от прямого тока $P_{изл} = f(I_{нр})$ (рисунок 3.9, для СИД инфракрасного спектра излучения).

Длина волны излучаемого света определяется разностью энергий двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов на излучательном этапе процесса рекомбинации, и зависит от выбора исходного полупроводникового материала и легирующих примесей. Длина волны излучения связана с изменением энергии электрона ΔE соотношением

$$\lambda = hc / \Delta E, \quad (3.4)$$

где h – постоянная Планка;

c – скорость света.

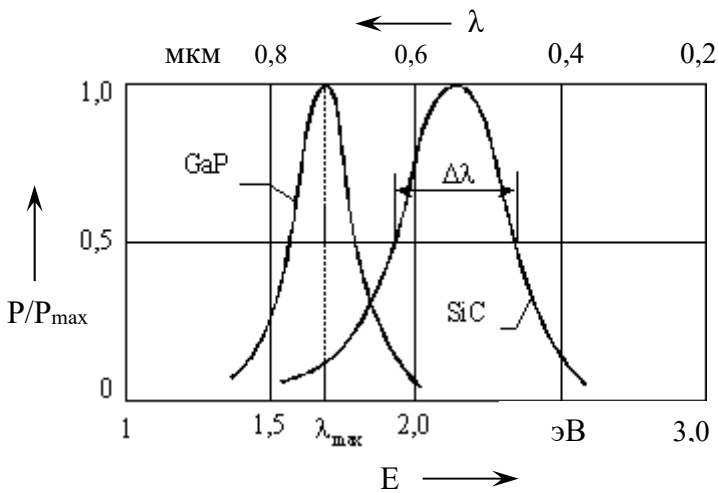


Рисунок 3.6 – Спектральные характеристики СИД

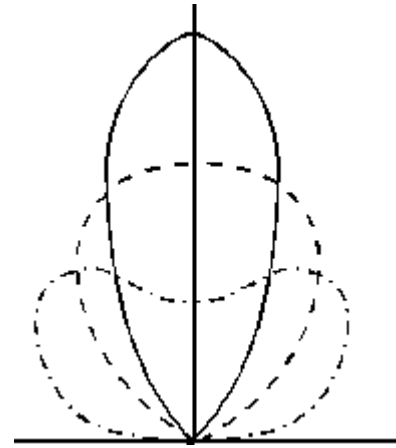


Рисунок 3.7 – Диаграммы направленности СИД различных типов

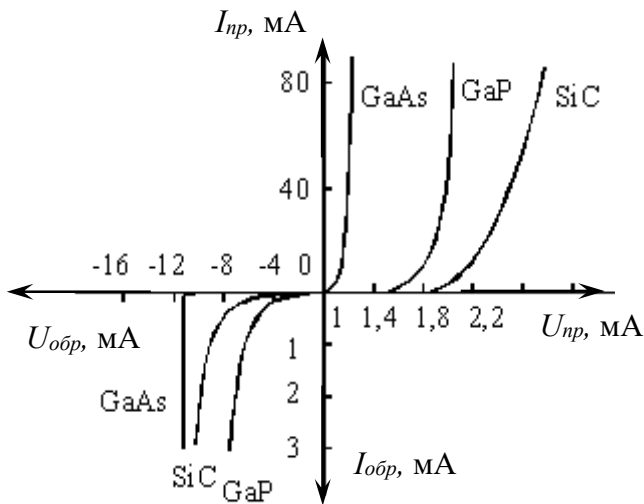


Рисунок 3.8 – Вольт-амперные характеристики СИД

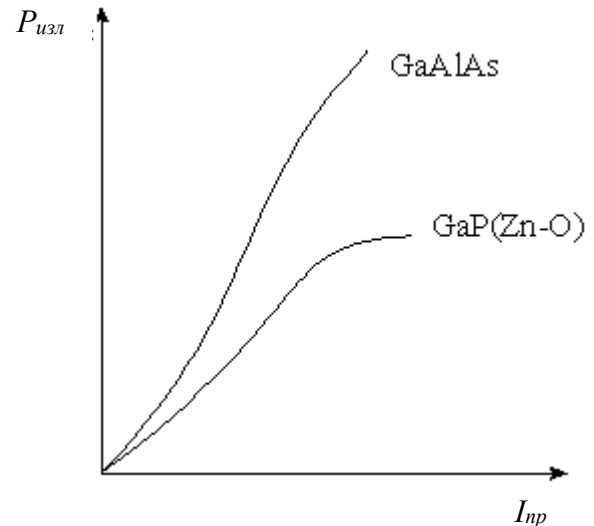


Рисунок 3.9 – Излучательная (ватт-амперная) характеристика СИД

Свет, видимый глазом человека, соответствует диапазону длин волн $0,45 < \lambda < 0,68$ мкм, а ΔE почти равно энергетической ширине запрещенной зоны E_g полупроводника, на основе которого изготовлен светоизлучающий диод. Чтобы кванты энергии (фотоны), освобожденные при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ($E_g > 1,8$ эВ). В связи с этим для изготовления светоизлучающих диодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP); карбид кремния (SiC), твердые растворы: галлий-мышьяк-фосфор (GaAsP) и галлий-алюминий мышьяк (GaAlAs), а также нитрид галлия (GaN), которые имеет большую ширину запрещенной зоны ($E_g \gg 3$ эВ), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового цвета.

Добавляя в полупроводниковый материал атомы веществ-активаторов, можно изменять цвет излучения диода. Например, на основе фосфида галлия, легированного цинком, кислородом или азотом, получают приборы зеленого, желтого и красного цветов свечения.

Светоизлучающие диоды предназначены для визуального восприятия информации человеком, поэтому необходимо учитывать эффективность воздействия излучения на зрение, которая зависит от длины волны излучения и определяется значением относительной функции видности.

Функция видности – это зависимость монохроматической чувствительности глаза человека (отнесенной к значению максимальной чувствительности) от длины волны воспринимаемого излучения. Максимальная чувствительность человеческого глаза соответствует зеленой части спектра, т. е. длине волны $\lambda = 0,55$ мкм. График этой функции показан на рисунке 3.10.

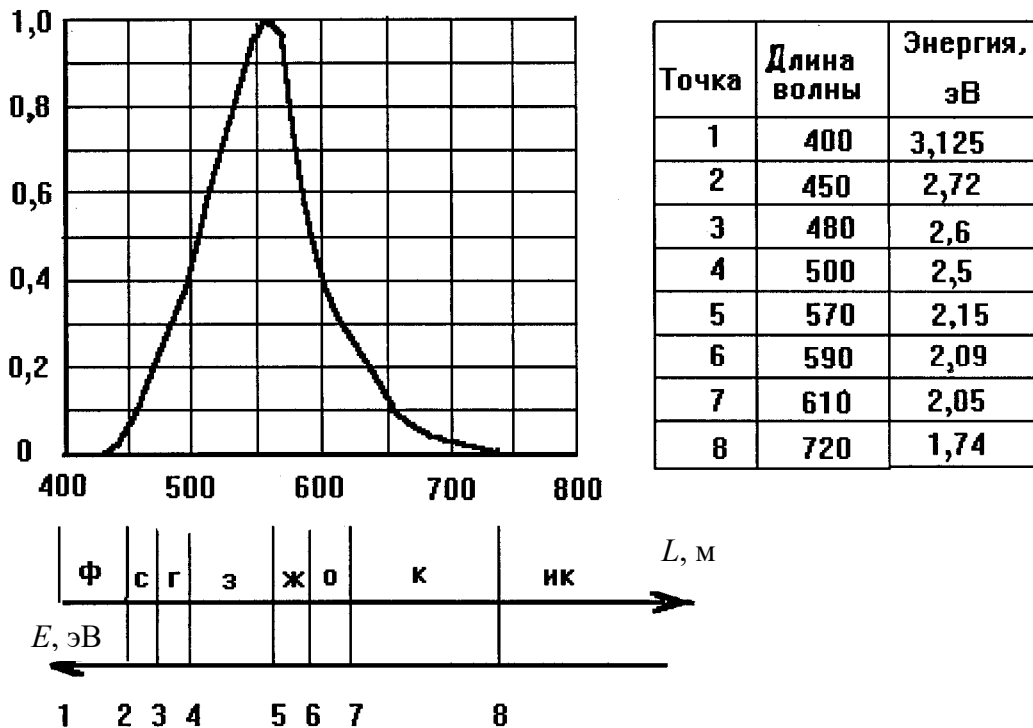


Рисунок 3.10 – Функция видности человеческого глаза

Режимы и схемы включения светодиодов. По электрическим свойствам СИД аналогичны германиевым и кремниевым диодам. Они излучают свет только тогда, когда смещены в прямом направлении. Питание СИД осуществляется в различных режимах: в режиме постоянного тока; в импульсном режиме; в функциональном режиме (например, питание током, сформированным по экспоненте).

Простейшим режимом питания СИД является режим постоянного тока. Схема включения СИД в этом режиме приведена на рисунке 3.11. На рисунке 3.12 представлен графический способ определения тока, протекающего через светодиод, путем наложения на прямую ветвь вольт-амперной характеристики СИД нагрузочной прямой, наклон которой зависит от величины сопротивления R .

Значение тока, протекающего через СИД, зависит от сопротивления R напряжения источника питания и падения напряжения на СИД:

$$I_{СИД} = \frac{U_{ИП} - U_{СИД}}{R}. \quad (3.5)$$

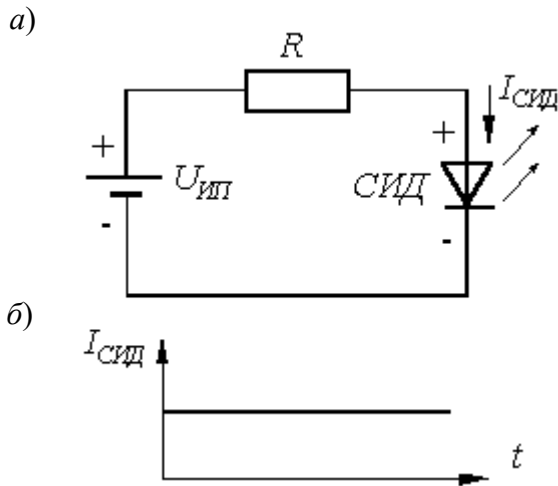


Рисунок 3.11 – Схема включения (а) и временная диаграмма работы СИД (б) в режиме постоянного тока

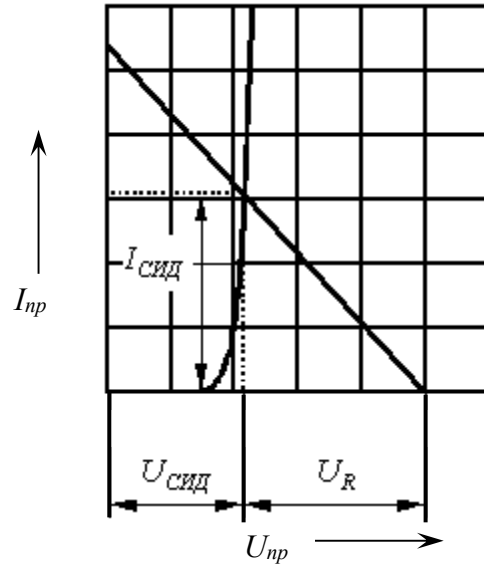


Рисунок 3.12 – Графический способ определения тока, протекающего через СИД

Световой поток, излучаемый СИД в режиме питания постоянным током, также является постоянным. Такой режим применяется в элементах визуальной индикации, подсветки различных информационных транспарантов, а также для ИК-подсветки в системах ночного видения. В системах невидимой передачи информации (оптическая связь, оптическая локация, оптические измерительные системы) необходима временная модуляция светового потока. В этих случаях применяется импульсный режим питания СИД.

Схема включения и временная диаграмма импульсного режима показаны на рисунке 3.13. Мощность излучения СИД в импульсном режиме изменяется со временем по следующему закону:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ P_0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_u; \\ 0 & \text{при } t > t_u. \end{cases} \quad (3.6)$$

Эффективное значение тока СИД в импульсном режиме

$$I_{\text{э.имп}} = \frac{I_u}{\sqrt{T/t_u}} = \frac{I_u}{\sqrt{Q}}, \quad (3.7)$$

где I_u – импульсный ток;
 T – период следования импульсов;
 t_u – длительность импульса;
 Q – скважность, $Q = T/t_u$.

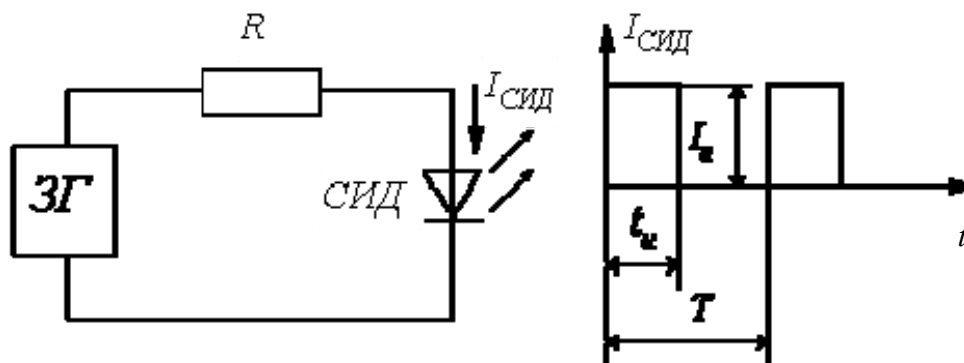


Рисунок 3.13 – Схема и временная диаграмма работы СИД в импульсном режиме, параметры которого задает генератор ЗГ

При работе в импульсном режиме можно получить достаточно высокую мощность излучения, на один-два порядка превышающую номинальную мощность излучения СИД. При этом, однако, следует так подбирать скважность, чтобы эффективное значение тока не превышало максимально допустимого постоянного тока СИД.

Выходные токи, необходимые для питания светодиодов без включения дополнительных предварительных каскадов, достигают 20 мА.

Описание установки

Лабораторная установка состоит из следующих основных частей (рисунок 3.14): регулируемый источник напряжения; токоограничивающее сопротивление R ; набор из четырех светоизлучающих диодов СИД (на схеме показан только один); фотодиод ФД; усилитель; цифровой мультиметр (многофункциональный, многопредельный измерительный прибор или вольтметр и амперметр).

Порядок выполнения работы

СИД через токоограничивающее сопротивление подключен к регулируемому источнику напряжения. Мультиметр позволяет измерять падения напряжений на СИД и на сопротивлении R . Падение напряжения на сопротивлении R пропорционально току, протекающему через СИД. В первой части работы снимаются вольт-амперные характеристики СИД, во второй – исследуются зависимости мощности излучения от величины прямого тока (ватт-амперные характеристики) для СИД.

Измерение мощности оптического излучения производится с помощью фотодиода (ФД), который присоединяется вплотную к исследуемому СИД. ФД подключен ко входу усилителя, который преобразует фототок в пропорциональное ему напряжение. Это напряжение измеряется мультиметром.

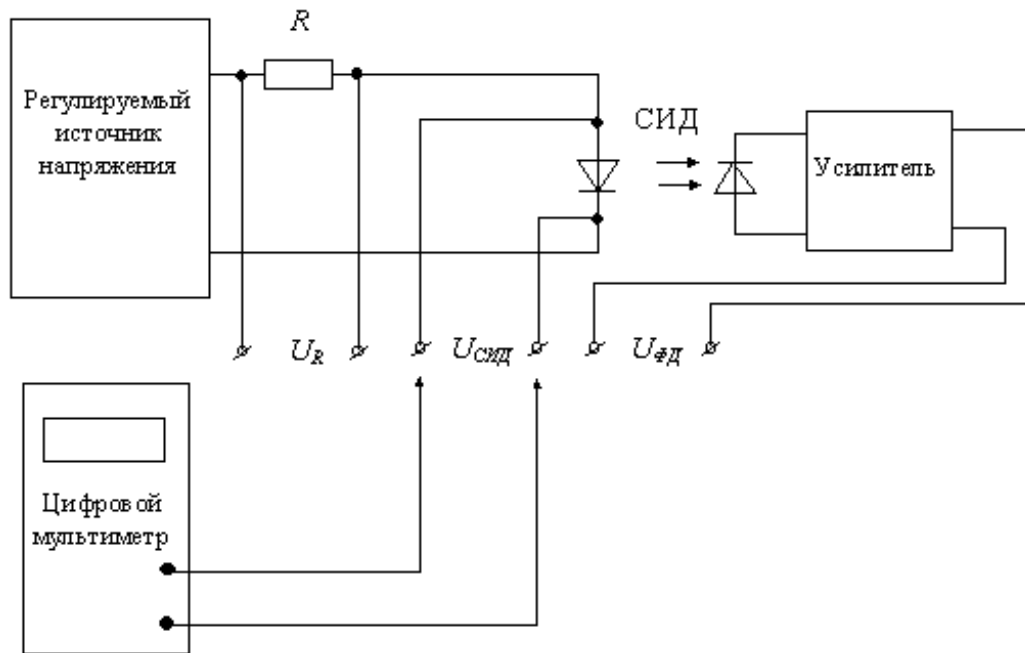


Рисунок 3.14 – Схема измерительной установки

Для определения мощности излучения СИД используется спектральная характеристика чувствительности измерительного ФД, которая позволяет рассчитать отклик ФД на излучение определенной длины волны (рисунок А.1).

Снятие вольт-амперной характеристики светоизлучающего диода.

- 1 Ознакомиться с расположением и назначением элементов установки.
- 2 Установить регулятор напряжения блока питания в крайнее левое положение.

3 Включить установку в сеть.

4 Изменяя напряжение на светодиоде, снять вольт-амперную характеристику, при этом **ток светодиода не должен превышать 20 мА**.

Необходимо получить не менее 10 пар значений тока и напряжения. Особое внимание уделить начальному участку характеристики. Данные занести в таблицу 3.1.

5 Установить регулятор напряжения в крайнее левое положение.

6 Повторить пп. 4 и 5 для других светодиодов.

Таблица 3.1 – Результаты измерений тока и напряжения СИД

СИД1	I_{cd} , мА										
	U_{cd} , В										
СИД2	I_{cd} , мА										
	U_{cd} , В										
СИД3	I_{cd} , мА										
	U_{cd} , В										

Снятие ватт-амперной характеристики светодиода.

7 Установить переключатель «Выбор светодиода» в положение «1».

8 Присоединить измерительный фотодиод, установленный в корпусе разъема, к держателю первого светодиода.

9 Изменяя ток светодиода, снять зависимость тока фотодиода от тока светодиода, выбирая измеряемую величину с помощью переключателя «Вид измерения». Необходимо получить не менее 10 пар значений тока и напряжения. Данные занести в таблицу 3.2.

10 Повторить п. 9 для другого светодиода.

Таблица 3.2 – Результаты измерений параметров СИД

СИД1	I_{cd} , мА										
	I_{fd} , мкА										
	$P_{изл}$, мВт										
	$\eta_{внешн}$										
СИД2	I_{cd} , мА										
	I_{fd} , мкА										
	$P_{изл}$, мВт										
	$\eta_{внешн}$										
СИД3	I_{cd} , мА										
	I_{fd} , мкА										
	$P_{изл}$, мВт										
	$\eta_{внешн}$										

Обработка результатов измерений.

1 По данным таблицы 3.1 построить вольт-амперные характеристики $I_{cd} = f(U_{cd})$ для всех светодиодов в одной системе координат.

2 По ВАХ определить пороговое значение $U_{cd\ пор}$, при котором начинается резкое возрастание тока светодиода I_{cd} .

3 Для каждого светодиода рассчитать энергетическую ширину перехода, соответствующего длинам волн излучения (указаны на панели установки). Построить зависимость $U_{cd\ пор}$ от энергии перехода.

4 По данным таблицы 3.2 рассчитать значение мощности излучения светодиода $P_{изл} = I_{фд}/S(\lambda)$, где $S(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности кремниевого фотодиода, применяемого для измерения мощности (см. рисунок А.1).

5 Для каждой пары значений $I_{сд}$ и $P_{изл}$ определить внешний энергетический выход (КПД) светодиода $\eta_{внешн}$ как отношение мощности излучения к электрической мощности, потребляемой светодиодом $\eta_{внешн} = P_{изл}/P_{потр}$. Для нахождения электрической мощности $P_{потр}$, потребляемой светодиодом, следует воспользоваться полученными ранее вольт-амперными характеристиками и формулой $P_{потр} = I_{сд} U_{сд}$. Вычислить среднее значение η .

6 Построить зависимости $P_{изл} = f(I_{сд})$ для светодиодов в одной системе координат.

Контрольные вопросы

1 Какой физический процесс приводит к излучению света полупроводниками?

2 Какова связь энергии фотона с длиной волны?

3 Как преобразуется энергия рекомбинации в излучательных и безызлучательных переходах?

4 Какие факторы оказывают влияние на величину коэффициента полезного действия электролюминесценции?

5 Какие процессы происходят при излучении света полупроводниковым p – n -переходом?

6 Какими электрическими и оптическими параметрами характеризуется СИД?

4 Лабораторная работа 3.4. Изучение температурной зависимости свойств металлов и полупроводников

Цель работы: изучение температурной зависимости сопротивления проводников, определение времени жизни неосновных носителей заряда методом модуляции проводимости.

Общие сведения

Согласно квантовой теории электропроводимости, удельное сопротивление металлов линейно возрастает с увеличением температуры и определяется следующим выражением:

$$\rho = \frac{m_e \cdot \langle v_f \rangle}{n \cdot q^2 \cdot \langle l \rangle}, \quad (4.1)$$

где q – заряд электрона;

m_e – масса электрона;

n – концентрация электронов проводимости в металле;

$\langle l \rangle$, $\langle v_f \rangle$ – средняя длина свободного пробега и средняя скорость теплового движения электрона с энергией Ферми соответственно.

В отличие от металлов электрическое сопротивление собственных полупроводников уменьшается с ростом температуры, изменяясь по закону

$$R = R_0 \cdot \exp \frac{\Delta E}{2k \cdot T}, \quad (4.2)$$

где R_0 – постоянная величина;

ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника, $\Delta E = E_c - E_v$;

E_c – энергия, соответствующая дну зоны проводимости;

E_v – энергия, соответствующая потолку валентной зоны;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

График зависимости $\ln R \left(\frac{1}{T} \right)$ представляет собой прямую линию, по наклону которой можно определить ширину запрещенной зоны ΔE .

У собственных полупроводников значение энергии Ферми E_f , отсчитанное от потолка валентной зоны, определяется формулой

$$E_f = \frac{\Delta E}{2} + \frac{3}{4} kT \cdot \ln \frac{m_p^*}{m_e^*}, \quad (4.3)$$

где m_p^* , m_e^* – эффективные массы дырки и электрона соответственно.

Обычно второе слагаемое в (4.3) очень мало, $E_f = \frac{\Delta E}{2}$ (уровень Ферми располагается в середине запрещенной зоны) и не зависит от температуры (германий, кремний). Однако есть полупроводники с сильно различающимися эффективными массами дырки и электрона, например, для антимонида индия $m_p^* \approx 10$ (таблица 4.1). В таких полупроводниках уровень Ферми лежит в верхней половине запрещенной зоны.

Таблица 4.1 – Значения эффективных масс электрона и дырки, ширины запрещенной зоны ΔE и температуры T_i , при которой уровень Ферми пересекает глубокий уровень

Параметры	Германий	Кремний	Антимонид индия
m_e^* , отн. ед.	0,22	0,33	0,013
m_p^* , отн. ед.	0,31	0,56	0,6
ΔE , эВ (300 К)	0,72	1,1	–
T_i , К	233	150	–

Если электрону передать энергию, то он может перейти из валентной зоны на ближайший свободный уровень зоны проводимости. Когда электрон покидает валентную зону, на его месте (в валентной зоне) возникает незаполненное состояние, называемое дыркой. Так возникают подвижные носители заряда (электроны и дырки) в полупроводниках. Процесс возникновения подвижных носителей заряда называется *генерацией*.

Электрон, перейдя из валентной зоны в зону проводимости, может через некоторое время возвратиться в исходное энергетическое состояние в валентной зоне. Это приведет к исчезновению пары подвижных носителей заряда. Такой процесс называется *рекомбинацией*. Среднее время существования носителей – электронов или дырок – называется *временем жизни носителей* τ . Это важнейшая характеристика полупроводникового материала, определяющая быстродействие микроэлектронных устройств. Генерация и рекомбинация пары «электрон – дырка» путем прямого перехода через запрещенную зону – сравнительно редкие события. Обычно эти процессы осуществляются через генерационно-рекомбинационные центры или глубокие энергетические уровни (ГУ), в роли которых выступают структурные дефекты кристаллической решетки полупроводника.

В отличие от донорных и акцепторных уровней ГУ – это энергетические уровни E_i , расположенные вблизи середины запрещенной зоны. На рисунке 4.1 показаны процессы генерации и рекомбинации носителей зарядов в полупроводнике донорного типа. При рекомбинации (процесс 1) электрон переходит из зоны проводимости на E_i , а затем в валентную зону, рекомбинируя там с дыркой. При снижении концентрации дырок вероятность перехода электрона с E_i в валентную зону уменьшается и возможен возврат его в зону проводимости.

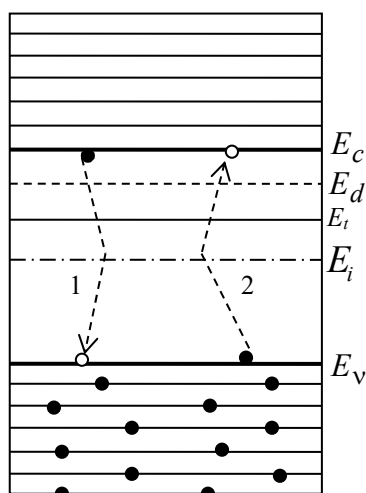


Рисунок 4.1– Пояснение процессов генерации и рекомбинации

Процесс 2 иллюстрирует генерацию пары «электрон – дырка».

Возникающие в результате теплового возбуждения носители заряда равномерно распределены по всему объему полупроводника, при этом скорость генерации носителей равна скорости их рекомбинации. Концентрация таких носителей называется равновесной и обозначается n_0 и p_0 .

Рассмотрим температурную зависимость положения уровня Ферми и равновесной концентрации основных носителей для донорного полупроводника (рисунок 4.2, а, б).

На рисунке T_1 и T_t – температуры, при которых уровень Ферми E_{fn} пересекает донорный уровень и глубокий уровень соответственно; T_2 – температура, при которой наступает собственная проводимость донорного полупроводника.

Наличие примесного уровня существенно изменяет положение уровня Ферми по сравнению с собственным полупроводником. При $T = \text{ОК}$ уровень E_{fn} находится посередине между дном зоны проводимости (уровнем E_c) и донорным уровнем E_d . С ростом температуры уровень E_{fn} опускается и приближается к E_d , при этом примесь все более ионизируется и отдает электроны в зону проводимости.

При $T > T_1$, когда уровень Ферми опускается ниже E_d , вся примесь ионизирована и концентрация электронов проводимости остается постоянной и равной концентрации примеси $n_0 = N_d$.

В области $T_d < T < T_2$ (рабочей области температур полупроводниковых приборов) положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости определяется следующей формулой:

$$E_{fn} = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d}, \quad (4.4)$$

где N_c – эффективное число энергетических состояний в зоне проводимости (постоянная величина для данного полупроводника).

Когда уровень Ферми E_{fn} достигает середины запрещенной зоны ($T = T_2$) в результате массового переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости, собственная концентрация носителей (электронов и дырок) резко возрастает и во много раз превышает величину N_d . При $T > T_2$ полупроводник обладает свойствами собственного полупроводника.

Рассмотрим, как изменяется время жизни носителей с изменением температуры при рекомбинации через ГУ в донорном полупроводнике (рисунок 4.2, в). При $T < T_t$ все ГУ заняты электронами, которые не могут рекомбинировать из-за ничтожного количества дырок в валентной зоне. Поэтому в этом интервале температур время жизни носителей τ постоянно и $\tau = \tau_{p0}$.

При $T > T_t$ начинается интенсивный переброс электронов с ГУ в зону проводимости. Заполнение ГУ уменьшается и тем самым снижается вероятность рекомбинации электрона с дыркой в валентной зоне и

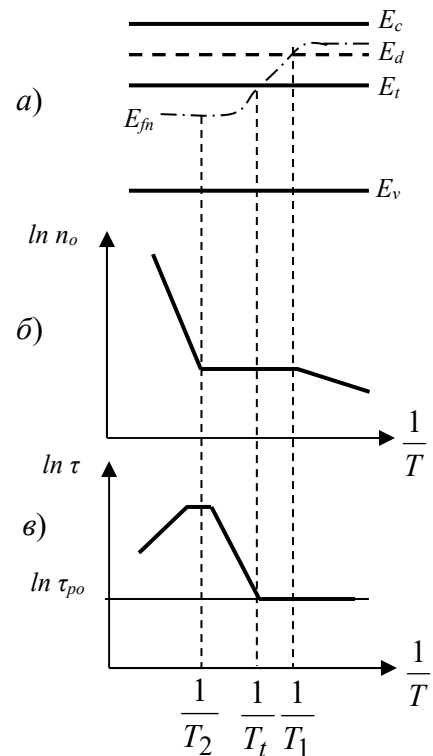


Рисунок 4.2 – Пояснение к температурной зависимости положения уровня Ферми

увеличивается время жизни дырки, которое и определяет общее время жизни носителей τ . Поэтому в области $T_n < T < T_2$ время жизни растет с увеличением температуры и подчиняется закону

$$\tau = \tau_{\rho 0} \frac{N_c}{N_d} \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right). \quad (4.5)$$

Если построить график $\ln \tau \left(\frac{1}{T}\right)$, то получится прямая линия, по наклону которой можно определить значение величины $E_c - E_t$, т. е. глубину залегания энергетического уровня ловушек. Из рисунка 4.2, в видно, что экстраполяция этой зависимости в область более низких температур позволит при $T = T_t$ определить значение величины $\ln \tau_{\rho 0}$.

В области собственной проводимости с повышением температуры ($T > T_2$) концентрация подвижных носителей заряда в зонах резко растет, поэтому увеличивается заполнение ГУ носителями заряда и время их жизни уменьшается.

Помимо теплового возбуждения, возможны другие способы увеличения концентрации подвижных носителей зарядов в полупроводниках, например, введение их через электрический контакт. При этом появляется дополнительная избыточная концентрация носителей тока Δn и Δp .

В отличие от равновесных, избыточные носители могут неравномерно распределяться по объему полупроводника, локализуясь в отдельных его областях. Общая концентрация носителей при этом определяется соотношениями $n = n_0 + \Delta n$ и $p = p_0 + \Delta p$ для полупроводников n - и p -типов соответственно.

В неравновесном состоянии полупроводника скорости генерации и рекомбинации неодинаковы и происходит накопление или рассасывание избыточных носителей в объеме полупроводника. Например, в донорном полупроводнике изменение концентрации неосновных носителей происходит по закону

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4.6)$$

где $\Delta p(0)$, $\Delta p(t)$ – избыточные концентрации неосновных носителей зарядов в начальный момент времени t соответственно.

Описание установки и методика измерений

На рисунке 4.3 приведена блок-схема лабораторной установки. Установка содержит осциллограф 1, генератор импульсов с источником нагрева 2,

термостат 3, в котором помещен исследуемый полупроводниковый материал и мультиметр 4, которым измеряется температура образца.

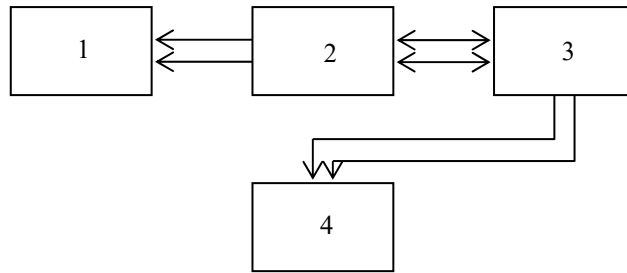


Рисунок 4.3 – Блок-схема установки

Время жизни неосновных носителей заряда измеряется методом модуляции проводимости. Этот метод заключается в следующем.

Носители заряда вводятся в образец полупроводника через точечный контакт при помощи импульса тока от генератора 2. Спустя некоторое время t_3 (время задержки) после окончания инжектирующего импульса, в течение которого происходят рекомбинация и диффузия инжектированных носителей, через образец пропускается второй, измерительный импульс тока. Падение напряжения на образце наблюдается с помощью осциллографа 1.

На рисунке 4.4, *a* показаны инжектирующий и измерительный импульсы тока, проходящего через образец, и соответствующие им импульсы напряжения (рисунок 4.4, *б*).

Уменьшение сопротивления образца, которое происходит во время инжекции носителей, приводит к уменьшению падения напряжения на образце, т. к. сила тока через образец остается постоянной. Поэтому импульс напряжения не повторяет форму импульса тока, а имеет спад, обусловленный возрастанием концентрации носителей. По окончании первого инжектирующего импульса тока процесс инжекции носителей в образец прекращается. Поэтому концентрация неравновесных носителей заряда начинает уменьшаться за счет процесса рекомбинации. Этому соответствует увеличение сопротивления образца и возвращение его к исходному значению. Закон изменения сопротивления образца во времени можно определить экспериментально, если исследовать зависимость падения напряжения на образце от времени задержки между инжектирующим и измерительным импульсами тока.

Обозначим максимальное значение падения напряжения на образце, соответствующее переднему фронту первого импульса тока, через $U(\infty)$, а падение напряжения в момент подачи измерительного импульса – через $U(t_3)$.

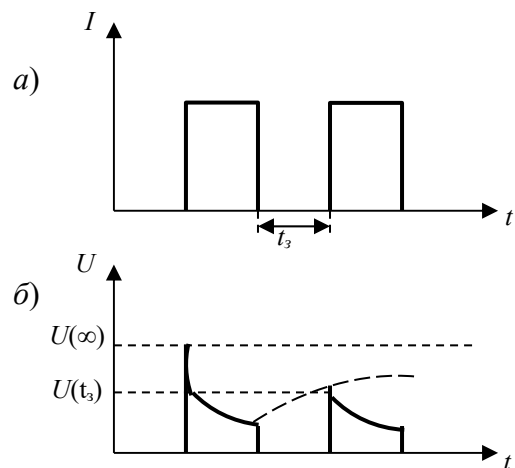


Рисунок 4.4 – Формы импульсов тока и напряжения

Тогда разность $\Delta U(t) = U(\infty) - U(t_3)$ есть изменение падения напряжения за счет существования избыточной концентрации неосновных носителей, которая изменяется со временем по закону

$$\Delta U(t) = C \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4.7)$$

где C – некоторая постоянная.

Фиксируя $U(\infty)$ и изменяя время задержки, можно построить зависимость $\ln \Delta U = f(t_3)$ и по ее наклону найти время жизни носителей заряда:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{d(\ln \Delta U)}{dt}. \quad (4.8)$$

На рисунке 4.4, б пунктирные линии показывают уровни напряжений $U(\infty)$, $U(t_3)$ и экспоненциальную зависимость изменения $U(t)$ со временем.

Программа работы

1 Убедиться в том, что на генераторе тумблер «Нагрев» стоит в нижнем положении.

Включить тумблеры питания на осциллографе 1 и генераторе 2. Установить переключатели на осциллографе в следующие положения: «синхронизация» – в положение У1, «множитель» – в положение 10, «развертка» – в положение 10 мкс. Ручкой «уровень синхронизации» получить на экране стабильное изображение импульсов, регуляторами «яркость», «фокус» и «астигматизм» – четкое изображение импульсов.

2 На генераторе переключатель «время задержки» поставить в положение 1. Регулятором «длительность импульса» установить необходимую длительность импульса так, чтобы на экране осциллографа наблюдалась устойчивая картина. С помощью регулятора «уровень полезного сигнала» установить амплитуду импульсов на всю высоту экрана осциллографа.

Внимание! На протяжении всех измерений регуляторы «длительность импульса» и «уровень полезного сигнала» не вращать.

3 Мультиметром 4 измерить температуру образца.

4 С помощью координатной сетки на экране осциллографа измерить изменение падения напряжения $\Delta U(t) = U(\infty) - U(t_3)$ (см. рисунок 4.4, б) при положениях 1–8 переключателя «время задержки». Полученные данные занести в таблицу 4.2.

5 На генераторе включить тумблер «нагрев» и измерения по пп. 3 и 4 провести при различных температурах образца (не менее чем при трех значениях температуры с шагом 10 °С). Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

6 Для всех измеренных значений ΔU вычислить $\ln(\Delta U)$.

7 Для каждого значения температуры образца построить график зависи-

Контрольные вопросы

- 1 Поясните основные положения зонной теории металлов, полупроводников и диэлектриков.
- 2 Объясните температурную зависимость сопротивления металлов с точки зрения квантовой теории.
- 3 Каков механизм проводимости собственных и примесных полупроводников?
- 4 Какое физическое явление используется в данной работе для измерения времени жизни неосновных носителей в полупроводниках?
- 5 Чем объясняется температурная зависимость времени жизни неосновных носителей?
- 6 Что такое рекомбинационно-генерационные центры (ГУ) и чем они отличаются от донорных и акцепторных уровней?
- 7 Объясните, какое влияние оказывают ловушки на время жизни носителей в полупроводниках.
- 8 Во сколько раз изменится проводимость металла при повышении температуры от 300 до 310 К? Как изменится при этом проводимость собственного полупроводника, у которого $\Delta E = 0,3$ эВ? Каков характер изменения проводимости в двух случаях?
- 9 Объясните, как изменяется концентрация равновесных носителей в донорном полупроводнике с повышением температуры.

Список литературы

- 1 **Смирнов, Ю. А.** Физические основы электроники: учебное пособие / Ю. А. Смирнов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2013. – 560 с.
- 2 **Умрихин, В. В.** Физические основы электроники: учебное пособие / В. В. Умрихин. – Москва : Альфа ; ИНФРА-М, 2012. – 304 с.
- 3 **Марголин, В. И.** Физические основы микроэлектроники: учебник для втузов / В. И. Марголин, В. А. Жабреев, В. А. Тупик. – Москва: Академия, 2008. – 400 с.
- 4 **Гуртов, В.** Твердотельная электроника: учебное пособие / В. Гуртов. – 2-е изд., доп. – Москва : Мир техносферы, 2005. – 408 с.
- 5 **Пасынков, В. В.** Полупроводниковые приборы: учебное пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 8-е изд., испр. – Москва : Лань, 2006. – 480 с.
- 6 **Валенко, В. С.** Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств / В. С. Валенко ; под ред. А. А. Ровдо. – Москва : Додэка-XXI, 2001. – 366 с.
- 7 **Елифанов, Г. И.** Физика твердого тела: учебное пособие для втузов / Г. И. Елифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1977. – 288 с.

8 **Нахалов, В. А.** Электронные твердотельные приборы : учебное пособие в 2 ч. / В. А. Нахалов. – Хабаровск : ДВГУПС, 2006. – Ч. 1. – 68 с.

9 **Митрофанов, О. В.** Физические основы функционирования изделий микроэлектроники : учебное пособие / О. В. Митрофанов, Б. М. Симонов, Л. А. Коледов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 168 с.

10 **Пароль, Н. В.** Фоточувствительные приборы и их применение: справочник / Н. В. Пароль, С. А. Кайдалов. – Москва : Радио и связь, 1991. – 112 с.

11 **Носов, Ю. Р.** Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – Москва : Радио и связь, 1989. – 359 с.

12 **Верещагин, И. К.** Введение в оптоэлектронику : учебное пособие для втузов / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. – Москва : Высшая школа, 1991. – 190 с.

13 **Мухитдинов, М.** Светоизлучающие диоды и их применение / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – Москва : Радио и связь, 1988. – 79 с.

14 **Коган, Л. М.** Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – Москва : Радио и связь, 1983. – 208 с.

15 **Водовозов, А. М.** Основы электроники: учебное пособие / А. М. Водовозов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 130 с.

Приложение А (обязательное)

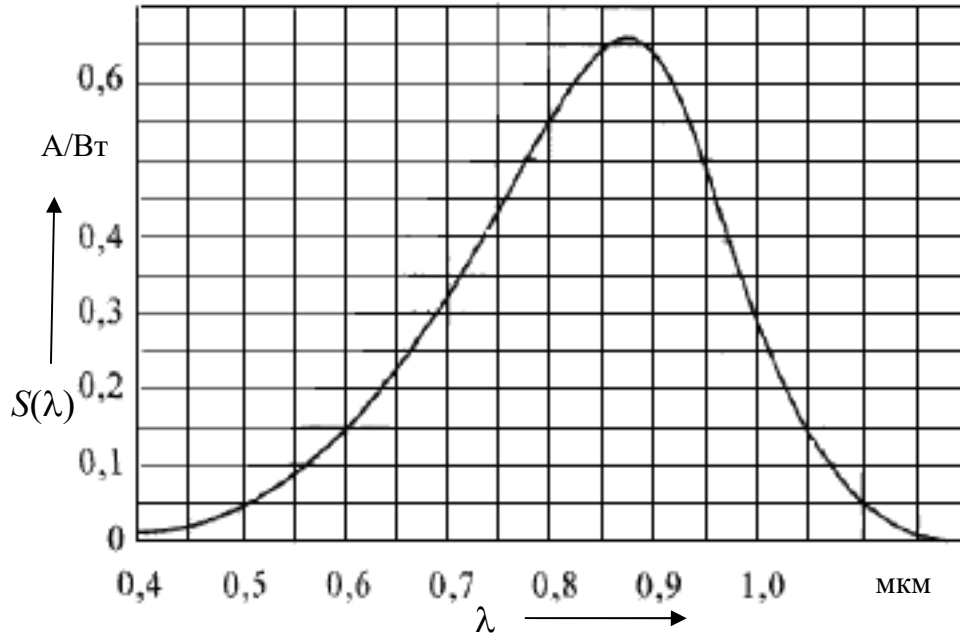


Рисунок А.1 – Спектральная характеристика чувствительности кремниевого фотодиода