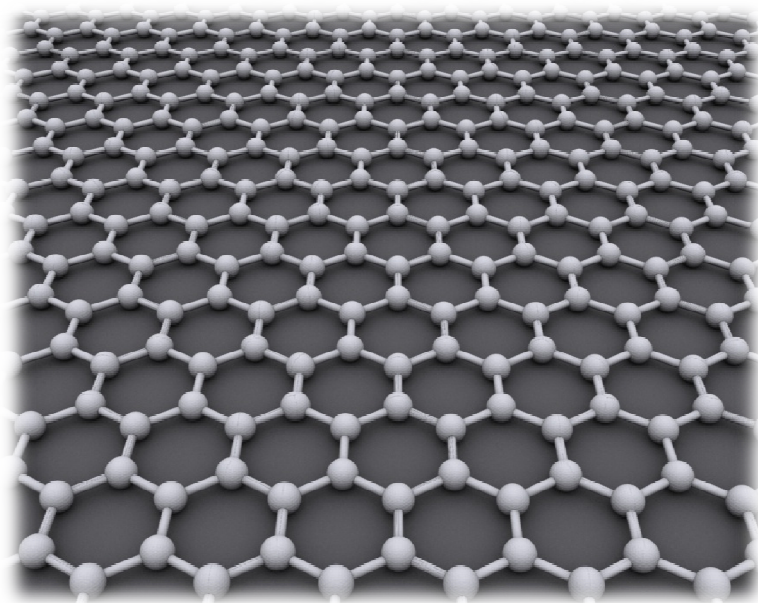


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

## **Физика конденсированного состояния**

*Методические указания  
к лабораторным работам  
для студентов бакалавриата и магистратуры  
физико-математического факультета*



ВОРОНЕЖ  
Воронежский госпедуниверситет  
2014

УДК 535(07)  
ББК В22  
А64

Издано по решению  
учебно-методического совета ВГПУ.  
Протокол № 5 от 20.12.2013 г.

Авторы:

*Г.В. Афонин, Р.А. Кончаков, Ю.А. Померанцев,  
М.В. Гольдфарб, В.А. Хоник*

Рецензент

доктор физико-математических наук,  
профессор *С.Н. Дрождин*

Научный редактор

доктор физико-математических наук,  
профессор *В.В. Свиридов*

**Физика конденсированного состояния:** методические указания к  
А64 лабораторным работам для студентов бакалавриата и магистратуры  
физико-математического факультета / Г.В. Афонин [и др.]. –  
Воронеж: Воронежский госпедуниверситет, 2014. –120 с.

В методических указаниях приводится описание установок и приборов, порядок выполнения, теоретическое обоснование, контрольные вопросы к лабораторным работам. Показано также, какими компетенциями должен обладать студент в результате выполнения лабораторных работ.

Издание предназначено для студентов бакалавриата по направлению 223200 «Техническая физика» специальности «Физика и техника функциональных материалов» и магистратуры по направлению 050100 «Педагогическое образование» специальности «Физическое образование» физико-математического факультета.

УДК535(07)  
ББКВ22

©Афонин Г.В., 2014

©Кончаков Р.А., 2014

©Померанцев Ю.А., 2014

©Гольдфарб М.В., 2014

©Хоник В.А., 2014

© Воронежский госпедуниверситет,  
редакционно-издательская обработка, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей проведения лабораторного практикума по физике является формирование у Вас, глубокоуважаемый студент, ряда специальных профессиональных компетенций, а именно:

- *способность применять на практике базовые профессиональные навыки (ПК-2);*
- *способность эксплуатировать современную физическую аппаратуру и оборудование (ПК-3);*
- *способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (в соответствии с профилем подготовки) (ПК-4);*
- *владение культурой естественнонаучного мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию профессионально значимой информации (СК-1);*
- *способность демонстрировать, применять, критически оценивать и пополнять физические знания для решения профессиональных задач в условиях старшей профильной школы (СК-2);*
- *способность осуществлять научное исследование в образовательной и научной области под квалифицированным руководством (СК-5);*
- *способность понимать и излагать в развитии получаемую научную и научно-методическую информацию и представлять достижения физической науки, физического образования в целом (СК-11).*

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы Вам придется решать ряд задач, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления
  - объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;
  - характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;
  - объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;
- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);
- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;

- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;
- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков; определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;
- анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

Все эти умения можно приобрести только в результате продолжительной целенаправленной самостоятельной работы и вдумчивом отношении к делу. Особенность занятий лабораторного практикума состоит в том, что они (в отличие от других учебных занятий) с первых шагов требуют Вашей самостоятельности, которая постепенно должна стать практически полной, при этом так работать нужно не только в лаборатории при сборке установки и проведении измерений, но и дома сначала при подготовке к измерениям, затем при графической, математической и литературной обработке результатов, а также при составлении отчета.

По цели, объему и содержанию лабораторные работы по физике могут резко различаться между собой. Однако все они содержат одинаковые последовательности общих по форме конкретных этапов. Более того, сравнительный анализ процессов выполнения учебной лабораторной работы и проведения научного эксперимента с использованием стандартной методики показывает, что в обоих случаях необходимо преодолевать одни и те же этапы, а именно:

- формулировка актуальности исследования данного физического явления;
- формулировка цели работы;
- постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления;
- анализ физических основ метода, используемого в работе, выяснение его точности и пределов применимости;
- предварительная подготовка к выполнению работы: выяснение последовательности конкретных задач и их формулировка, выделение величин, получаемых прямыми и косвенными измерениями, составление таблиц для записи результатов измерений и их начальной обработки;
- сборка установки, проведение измерений, четкая запись результатов, регистрация характеристик и параметров используемых приборов, условий проведения опыта; прикидочная оценка значения измеряемой величины или характера исследуемой зависимости для устранения грубых ошибок; установление надежности результатов измерений;

- математическая обработка результатов измерений и оценка погрешности определения искомых величин с достаточной степенью достоверности;
- систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков;
- формулировка выводов, литературное оформление результатов опыта – написание отчета по работе.

Первые пять этапов – это Ваша самостоятельная работа до проведения измерений в лаборатории, а три последних – после их окончания. Остальные этапы работы выполняются под непосредственным руководством преподавателя и лаборанта.

Выполняя работы физического практикума, приучайте себя с самого начала выделять самостоятельно в каждой из работ все перечисленные девять этапов. Возможно, что вначале это не всегда будет получаться, какие-то этапы или моменты в них окажутся неочевидными. Обращайтесь с вопросами к преподавателю. Если сделать такой подход к работам для себя обязательным, то он постепенно станет привычным. Тем более, если преподаватель возьмёт на себя обязанность отдельно оценивать означенные этапы при защите Вами работы. А так как для выполнения лабораторных работ по всем дисциплинам нужны практически одни и те же общие умения и навыки, то выполнение и контроль заявленных этапов работы значительно облегчит Вам также выполнение лабораторных работ, по другим дисциплинам.

Выполнение каждого этапа – это определенное действие. Система действий, связанных с осуществлением всех этапов, есть Ваша деятельность при выполнении учебного эксперимента. Овладев такой деятельностью, Вы сможете ее использовать и совершенствовать в ходе других практикумов и затем в условиях производства.

Учитывая важность этой деятельности и для обеспечения верного и сознательного ее усвоения, мы сочли целесообразным наглядно изобразить ее структуру в виде таблицы (табл. 1). В ней приведены не только действия (этапы деятельности), а также результат каждого действия, т.е. цель, на достижение которой оно направлено, и умение – качество личности, которое Вы постепенно должны вырабатывать, выполняя данное действие.

Таблица 1

п. п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
1.	Определение актуальности исследования данного физиче-	Обобщающие знания о месте и роли исследуемого физического явления	Формулировать системные представления о физических процессах,	Системных обобщений, синтеза знаний

п. п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
	ского явления	в конкретном разделе физики, всей физической науки в целом	явлениях	
2.	Определение цели эксперимента	Формулировка цели работы	Умение формулировать цель	Выделения частного из общего
3.	Постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления	Обобщающие знания о сущности исследуемого физического явления с поиском способов экспериментальной проверки его сущностных зависимостей	Формулировать сущностные признаки и связи исследуемого физического явления	Вычленять из всей совокупности знаний об исследуемом физическом явлении сущностные причинно-следственные связи
4.	Изучение литературы (описания работы)	Сведения о свойствах конкретного объекта и физических основах метода его исследования	Умение обосновать выбор объекта и метода, приводящих к достижению цели	Определения из литературных данных оптимальных способов проведения эксперимента
5.	Подготовка к проведению измерений	Перечень задач работы. Схема установки. Протокол с таблицами для записи результатов измерений	Умение обосновать последовательность задач, анализировать схему, продумать и готовить таблицы для записи результатов	Анализа и синтеза экспериментальной работы
6.	Подготовка установки и проведение опыта	Результаты измерений в виде таблицы	Умение работать с приборами, снимать показания, надежно их записывать, выдерживать и фиксировать условия опыта	Работы с измерительными приборами
7.	Обработка результатов измерений. Оценка погрешности измерения исходных величин	Значения величин, измеренных прямо и косвенно, с указанием погрешности их измерения	Умение обрабатывать результаты и оценивать погрешность измерения	Работы с множеством экспериментальных данных
8.	Систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение	Сводные обобщающие таблицы, графики, выводы. Отчет по работе	Умение систематизировать и обобщать результаты, представлять их графически,	Проведения анализа, синтеза и обобщения экспериментальных данных. Сопостав-

п. п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
	графиков, формулировка выводов. Составление отчета по работе		составлять отчет по выполненной работе	ление полученных результатов с заявленными целями работы. Формулировка выводов

Результат учебного эксперимента – умение студентов проводить эксперимент, т.е. усвоенные Вами знания об эксперименте как методе исследования, о деятельности по его осуществлению и умения, необходимые для его грамотного проведения.

Выполнение лабораторной работы есть определенная последовательность действий:

подготовка к эксперименту;

- проведение измерений;
- обработка полученных результатов;
- формулировка выводов и написание отчета.

Для грамотного и быстрого их выполнения у каждого из Вас должна сложиться определенная система знаний и умений (ориентировочная основа действия), которая обеспечит правильное и рациональное исполнение действия. Другими словами, всякому действию должны предшествовать обосновывающие его знания. В данном случае это не только описание конкретной лабораторной работы, но и определенные разделы курса, а также знания по физике и математике, полученные Вами в средней школе, и умение пользоваться методическими указаниями по обработке экспериментальных результатов, назначению и устройству современных измерительных приборов.

Поэтому выполнение каждой лабораторной работы по физике необходимо начинать с изучения ее описания, и приведения знаний в систему, а именно:

ясно представить себе общую цель данной конкретной лабораторной работы и последовательность задач, решение которых приведет к достижению окончательной цели;

- знать, какое физическое явление изучается в данной работе и какими зависимостями связаны величины его описывающие;
- знать основные особенности объекта исследования (образец, поток частиц, излучение);
- изучить и уметь объяснить физические основы используемых в работе методов измерения искомых величин;
- уметь нарисовать принципиальную схему используемой установки и знать назначение каждого из ее узлов;

- знать последовательность выполнения этапов лабораторной работы;

- иметь общее представление об ожидаемых результатах проводимого эксперимента и суметь выбрать метод, нужный для их математической обработки.

Только такая основательная и систематическая подготовка к каждой работе позволит сознательно выполнять лабораторные работы по физике и целенаправленно вырабатывать у себя необходимые для Вашей будущей деятельности умения и навыки.

Проверять степень своей готовности к выполнению каждой конкретной работы нужно с помощью приводимых ниже обобщенных контрольных вопросов. Они являются общими для всех работ физического практикума. Поэтому полезно (для экономии времени) не только обязательно отвечать на них, готовясь к работе, но и запомнить их как общий принцип подхода к выполнению лабораторных работ вообще.

### **Обобщенные контрольные вопросы**

1. В чём актуальность проведения данной работы?
2. Какова цель работы?
3. Какие сущностные связи характерны для исследуемого физического явления?
4. Каковы возможные экспериментальные пути для проверки сущностных причинно-следственных связей исследуемого физического явления?
5. Что представляет собой объект исследования в данной работе?
6. Какие физические явления положены в основу экспериментального метода определения искомой величины (величин)?
7. Какие допущения сделаны в теории метода?
8. Какая теоретическая зависимость может быть проверена в данном конкретном опыте?
9. Какие конкретные задачи в ходе проведения измерений придется решать для достижения цели?
10. Каково назначение отдельных узлов экспериментальной установки?
11. Какие требования техники безопасности необходимо соблюдать при выполнении данного учебного эксперимента?
12. Какие меры нужно принимать в ходе эксперимента для предупреждения и исключения вредных воздействий на окружающую среду?
13. Какие таблицы нужны в протоколе для записи и начальной обработки результатов измерений?



14. Какие зависимости должны быть построены по полученным данным?

15. Какое уравнение (или система) позволяет найти искомую величину или нужную зависимость на основании опытных данных?

16. Какие постоянные (табличные данные, параметры образца и установки) нужны для определения искомой величины по данным опыта?

17. Как будет определена погрешность прямых измерений?

18. Как придется оценивать погрешность конечного результата?

19. Как можно проверить достоверность полученных экспериментальных результатов?

20. Совпадает ли результат эксперимента с предсказанием теории?

21. Чем вызвано расхождение результатов эксперимента и теории?

22. Можно ли сопоставить результаты эксперимента с литературными данными?

23. Достигнута ли цель работы?

На вопросы 1-9 Вы должны ответить при подготовке к работе и отразить эти ответы в конспекте. На вопросы 10-12 — при непосредственном знакомстве с установкой и в ходе беседы при допуске к работе. На последнюю группу вопросов 13-23 — в ходе опыта, обработки результатов, их систематизации и описании в отчете.

Эта система вопросов очень важна и по другой причине.

Психологами установлено, что процесс приобретения и развития знаний не может протекать и даже начаться без постановки и решения самых разнообразных вопросов. Любой шаг в познании предварен вопросом о том, чем данная информация важна. Именно вопросами выражается первое пробуждение мысли. Овладение умением правильно ставить вопросы не менее важно, чем нахождение способов получения ответов. Поэтому, используя принцип подхода к эксперименту заданный обобщенными вопросами, учитесь ставить и формулировать вопросы, связанные с содержанием конкретной работы.

### **Требования обобщенного характера к структурным элементам знаний по физике**

При самостоятельном изучении всех разделов курса физики Вы имеете дело с такими понятиями, как: явление, величина, метод, закон, теория. Они будут встречаться и при подготовке к лабораторным работам. Для целенаправленного их изучения и изложения полезно знать требования обобщенного характера к этим структурным элементам научных знаний. Они могут исполнять роль планов при построении ответов.

Что нужно знать о каждом конкретном физическом явлении?

- Когда и кем открыто и впервые изучено явление?

- Внешние признаки проявления явления.
- Условия, при которых наблюдается явление.
- Механизм протекания явления (объяснение на основе современных теорий).
- Связь данного явления с другими.
- Количественные характеристики явления:
  - а) величины, характеризующие явление;
  - б) связь между величинами и формулы, выражающие эту связь.
- Примеры использования явления на практике, способы предупреждения его вредного воздействия.
- Определение явления.

Что нужно знать о каждой конкретной физической величине?

- Для чего введена данная величина?
- Общепринятое буквенное обозначение величины.
- Аналитическое выражение этой величины.
- Скалярная или векторная данная физическая величина?
- Единицы физической величины (в СИ обязательно).
- Методы измерения этой физической величины?
- Определение величины.

Что нужно знать о каждой конкретной модели?

- Название модели.
- Вид модели.
- Оригинал (прототип модели).
- Цель введения модели.
- Способ построения (описание) модели.
- Условия замены оригинала моделью.
- Определение модели.

При построении определений физических явлений, величин и моделей следует пользоваться нижеприведенными схемами.

Например:

*теплопроводность* — это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела (или тел) к менее нагретым частям (или телам), осуществляемый хаотически движущимися частицами тела (атомами, молекулами, электронами и т. п.);

*кристаллы* — твёрдые тела, в которых атомы расположены закономерно, образуя трёхмерно-периодическую пространственную укладку — кристаллическую решётку.

Что нужно знать о методе исследования каждого конкретного физического явления или измерения физической величины.

- Для изучения какого физического явления или измерения какой физической величины применяется метод?
  - Прямым или косвенным является этот метод?
  - Физические основы метода.
  - Области (границы) применимости метода.
  - Точность метода. При каких обязательных условиях она достигается?
  - Преимущества и недостатки данного метода по сравнению с другими.

Что нужно знать о каждом конкретном приборе?

- Название и марка (тип) прибора.
- Назначение прибора, т.е. для измерения каких физических величин или получения каких сигналов предназначен прибор.
  - Одноцелевым или многоцелевым является данный прибор?
  - Принцип действия прибора (желательно).
  - Основные узлы (части) прибора и их назначение.
  - Пределы значений величин или сигналов, допускаемые при работе с прибором.
    - Правила обращения (работы) с прибором.
    - Погрешности или предел допускаемой погрешности прибора.
    - Условное изображение прибора на схемах.

Что нужно знать о законе?

- Кем и когда открыт закон?
- Связь между какими величинами выражает закон?
- Формулировка закона.
- Аналитическое выражение (формула, выражающая закон).
- Опыты, подтверждающие справедливость закона.
- Примеры учета и использования закона.
- Границы применимости данного закона.

Что нужно знать о каждой конкретной теории?

- Кем и когда создана теория?
- Основные положения теории.
- Факты, послужившие основанием для разработки теории.
- Математический аппарат теории (основные уравнения).
- Круг явлений, объясняемых данной теорией (пределы применимости теории).
  - Явления и свойства материи, предсказанные теорией.

## Начальная обработка результатов измерений

Особенность данного этапа обработки в том, что его выполняют сразу после получения экспериментальных данных, т.е. прежде чем разобрана рабочая установка. Это позволяет при необходимости проверить отдельные точки, участки или даже всю зависимость в целом. В ходе такой обработки Вы сможете увидеть, значений каких величин (или постоянных параметров) у Вас еще нет, понять, откуда они могут быть взяты.

Начиная обработку результатов сразу после их получения, т.е. на лабораторном занятии, действуйте в такой последовательности:

- постройте зависимость между величинами по данным опыта, если они непосредственно измерялись;
- сопоставьте вид полученной зависимости с теоретически предполагаемым;
- определите однократно из графика значение нужной величины;
- вычислите конечный результат, используя данные 28 графика.

Иногда оказывается, что величины, зависимость между которыми должна быть построена, непосредственно не измерялись. Тогда начинать обработку придется в иной последовательности, а именно:

- вычислите, используя данные опыта, и запишите в таблицу значения величин, необходимых для построения графика; если экспериментальных данных много, то можно брать пока значения через точку (или даже через две), это сократит объем и ускорит работу;
- постройте зависимость между величинами, используя результаты вычислений;
- сравните вид полученной зависимости с предполагаемым теоретически.

После того, как график построен, обработку продолжайте как и в предыдущем случае.

Требование – успевать на занятии не только получить данные, но и построить снятую зависимость должно стать для Вас обязательным правилом.

Построенную зависимость и протокол с таблицами данных предъявите преподавателю для проверки и окончательной подписи. Хорошо, если тут же Вы подумаете о завершении обработки результатов, т.е. представите, что нужно делать для ее окончания и уточните неясные моменты. Обсуждать вопросы обработки, имея график и результаты, уже значительно проще.

Вы уже, вероятно, обратили внимание на то, что осмысливать результаты легче, если они изображены графически. Помимо наглядности графики необходимы для определения значений отдельных величин. График – очень распространенный способ представления экспериментальных результатов. Поэтому стройте их, выполняя общепринятые правила:

- используйте только миллиметровую бумагу и карандаш;
- откладывайте по оси абсцисс аргумент (переменную, условно принятую в данном эксперименте за независимую), а по оси ординат – функцию;
- выбирайте масштаб таким, чтобы он легко читался, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу – 1, 2, 5, 10 единиц откладываемой величины;
- пишите на осях числовые значения только для крупных единиц масштаба, делайте это за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс);
- стройте ту область значений, которая была исследована в опыте;
- не давайте начало координат (точка 0, 0), если это не имеет особого физического смысла (результат начального измерения);
- наносите на график все полученные при измерениях значения;
- проводите кривую плавно, по усредненным значениям, избегая изломов и перегибов;
- используйте разные обозначения точек при построении на одном графике нескольких кривых одной и той же зависимости, полученных при разных условиях опыта;
- снабжайте каждый график подрисуночной подписью (внизу листа), содержащей словесное название зависимости, которая на нем представлена, и условий ее получения, т.е. раскрывающей назначение и возможности использования графика;
- пишите обязательно на обратной стороне графика свою фамилию и номер группы.

## **Окончательная обработка результатов измерений**

Общеизвестно, что принципиально невозможно измерить абсолютно точно значение какой-либо физической величины. Поэтому всегда необходимо учитывать полную погрешность опыта и указывать ее в окончательном результате. Полная погрешность опыта складывается из:

- погрешности, связанной с неидеальностью объекта исследования;
- погрешности метода;
- приборных погрешностей;
- ошибок, связанных с проведением данного конкретного опыта – промахи, систематические и случайные ошибки.

Все виды перечисленных погрешностей, кроме случайных, могут быть оценены и практически учтены или устранены еще до начала систематических измерений.

При выполнении работ физического практикума Вы не учитываете ошибок, обусловленных неидеальностью объекта исследования и самим

методом. Допускается, что объект идеален, а метод позволяет верно наблюдать и достаточно точно оценивать изменение величины. Конечно, это далеко не всегда так, поэтому в описании работы бывают специально оговорены условия, ограничивающие применение метода. Нужно учиться подходить к учету таких ошибок. Это Вам пригодится в дальнейшей экспериментальной работе.

Оценку погрешности измерения величины для конкретной работы начинайте с расчета и указания в протоколе приборной погрешности. Об этом уже говорилось в разделе «Как проводить измерения». Помните, что погрешность прибора нужно определить обязательно в конце данной работы, пока все приборы перед Вами. Выработайте привычку кончать работу и разбирать установку только после того, как записаны погрешности приборов и выполнена предварительная обработка результатов измерений.

По результатам опыта Вы оцениваете случайные ошибки. Это можно сделать только после проведения достаточно большого числа измерений. Общепринятый метод вычисления случайной погрешности основан на предположении о том, что распределение случайных ошибок в процессе данного опыта соответствует нормальному закону распределения случайной величины.

Таким образом, проведя эксперимент, необходимо вычислять не только значение физической величины, но и погрешность ее измерения, используя особые приемы и методы, разработанные математиками, т.е. выполнять математическую обработку результатов измерений. Это следует делать, пользуясь пособиями, которые Вам рекомендованы.

Вычисление суммарной погрешности измерения величины в каждой работе имеет свои особенности. Однако схемы расчета оказываются общими для всех работ. Они должны быть усвоены, так как Вам предстоит применять их не только при выполнении физического практикума, но и в дальнейшем в работах специальных лабораторий.

Выполнение вышеприведённых рекомендаций и требований к выполнению физического практикума должно приводить к формированию заявленных в начале специальных профессиональных компетенций бакалавра физико-математического образования по специальности «физика». Более подробно с рекомендациями по выполнению физического практикума можно ознакомиться в методическом пособии Кесаманлы Ф.П., Коликова В.М. Физика. **Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов.** Методическое пособие для студентов. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007., 56 с., а также в методическом пособии В.А. Хоник **Оценка погрешностей измерений. Методические указания.** Воронеж, ВГПУ, 2007, 24 стр.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## Исследование ВАХ металла при различных температурах.

**Цель работы:** Исследовать ВАХ металла при различных температурах.

**В работе используются:**

1. Измеритель статических характеристик ИСХ1;
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03;
3. Соединительные провода с наконечниками.

## Теоретическая часть

Металлы обычно определяются как вещества пластичные, с характерным блеском, хорошо проводящие электрический ток и теплоту.

Для электропроводности металлов типичны:

- а) низкое значение удельного сопротивления при комнатной температуре (от сотых долей до единиц мкОм/м);
- б) значительный рост сопротивления при повышении температуры, близкий к прямой пропорциональной сопротивлению уменьшается до очень малого значения, составляющего для наиболее чистых металлов  $10^{-5}$  или даже меньшую долю сопротивления при комнатной температуре.

Электропроводность  $\sigma$  металлов зависит от концентрации свободных электронов  $n$  и их подвижности  $\mu$

$$\sigma = en\mu = \frac{e^2 n}{m} \bar{\tau}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса носителей заряда,  $\bar{\tau}$  – среднее время свободного пробега носителей заряда.

Концентрация свободных электронов в металле составляет примерно  $10^{28} \text{ м}^{-3}$ , т.е. того же порядка, что и число атомов в единице объема. В проводимости принимают участие валентные электроны. Они обобществляются кристаллической решеткой металла при очень низких абсолютных температурах. Другие электроны очень прочно связаны с атомами и не становятся свободными даже при очень высоких температурах. Из этого следует, что концентрация носителей заряда в металлах не зависит от температуры. Среднее время свободного пробега носителей заряда при повышении температуры металлов уменьшается по закону  $\bar{\tau} \propto 1/T$ , что объясняется рассеянием их на фононах. Сделанное утверждение не относится к области очень низких температур, при которых основным становится рассеяние на примесях и других дефектах кристаллической решетки. Поскольку электропроводность обратно пропорциональна удельному электрическому сопротивлению вещества, то сопротивление металла линейно

растет с повышением его абсолютной температуры по закону

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (2)$$

где  $R_0$  – сопротивление при некоторой условной температуре  $T_0$  (обычно при 273 К),  $\Delta T = (T - T_0)$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, показывающий относительное изменение величины сопротивления при изменении температуры на один градус  $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T}$ , где  $\Delta R = R - R_0$ .

Коэффициент  $\alpha$  для металлов положителен, почти не меняется с температурой и мал по абсолютной величине по сравнению с  $\alpha$  для полупроводников. В таблице 1 приведены значения температурных коэффициентов сопротивления для некоторых металлов.

Таблица 1

Металл	Медь	Вольфрам	Платина	Хром	Никель	Палладий	Серебро
$\alpha, \text{K}^{-1} \times 10^{-3}$	4,3	5,0	3,9	2,4	6,7	3,6	4,1

Заметим, что зависимость (2) нельзя экстраполировать до абсолютного нуля температур, при стремлении к которому сопротивление обычных металлов (не сверхпроводников) стремится к некоторой конечной величине, обусловленной наличием примесей и дефектов решетки.

## Описание установки

Исследование вольт-амперных характеристик металла производится с помощью модульного учебного комплекса МУК-ТТ2, состоящего из стенда с объектами исследования СЗ-ТТ03 (рис. 1) и измерителя статических характеристик ИСХ1 (рис. 2).

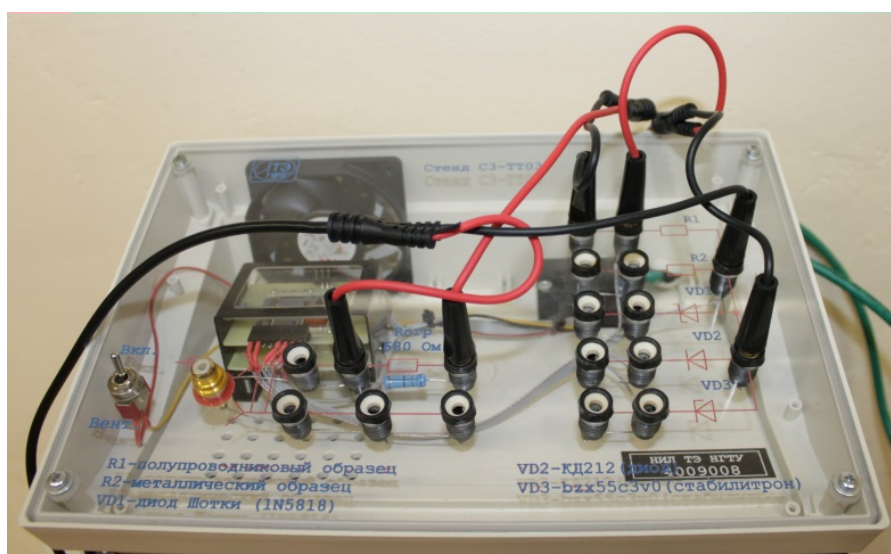


Рис. 1. Стенд СЗ-ТТ03.



В качестве металлического образца используется металлический терморезистор.

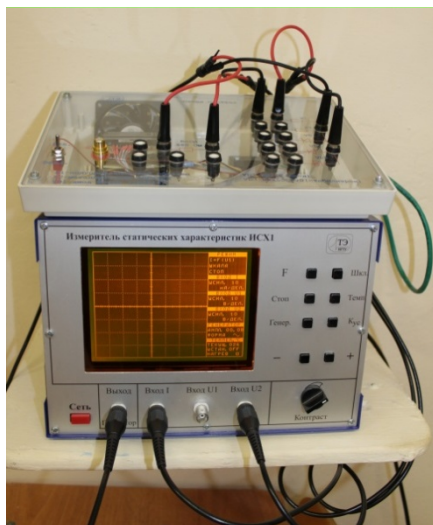


Рис. 2. Измеритель статических характеристик ИСХ1

Электрическая схема для проведения измерений представлена на рис. 3. Так как сопротивление металлического терморезистора намного меньше внутреннего сопротивления канала  $U_2$  ИСХ1, то прибор подключается параллельно измеряемому сопротивлению. Прибор ИСХ1 позволяет проводить запись полученных данных на ЭВМ через СОМ-порт. Для этого необходимо воспользоваться программой управления прибором.

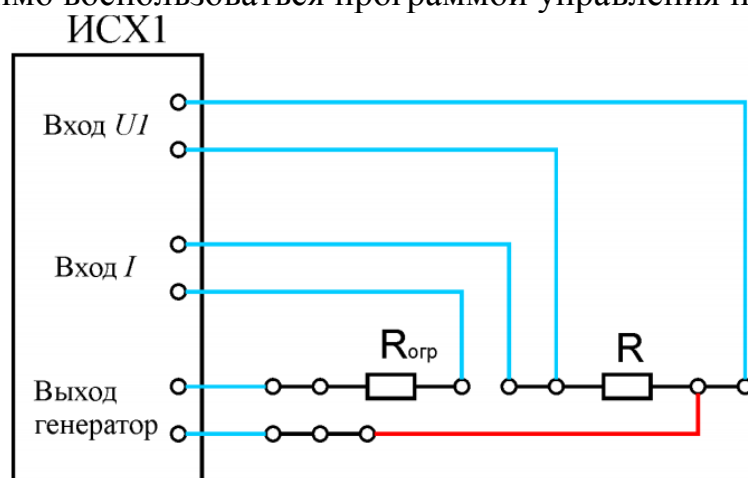


Рис. 3. Электрическая схема для проведения измерений.

## Выполнение работы

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели).
2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный). Для этого нужно нажать кнопку «Генер», в меню выбрать пункт «Форма» и с помощью кнопок «←» и «+» выбрать пилообразный сигнал.

3. Установите амплитуду выходного сигнала, используя кнопку « $K_{yc}$ ».
4. В меню «Режим » выберите функцию  $U_2=f(I)$  и получите на экране измерителя ВАХ металла при температуре 30°C, установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $U_2$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах 60°C, 90°C и 120°C.

### Контрольные вопросы

1. Зонная структура металлов.
2. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в металлах.
3. Механизмы электросопротивления металлов.
4. Основные положения классической теории электропроводности металлов.
5. Объясните зависимость ВАХ металлов от температуры.

### Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря, Г. Г. Основы физики полупроводников / Г. Г. Зегря, В. И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008. - 792 с.
6. Давыдов А.С. Теория твердого тела. / А.С. Давыдов. - М. : Наука, ГРФМЛ, 1976. -640 с.
7. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир, 1979.- 458 с.
8. Павлов П.В. Физика твердого тела. / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. / Дж. Займан. - М.: Мир, 2004 г.,-472 с.
10. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. / Дж Блейкмор. –М.: Мир, 2006 г.,- 608 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Исследование ВАХ полупроводника при различных температурах

**Цель работы:** Исследовать ВАХ металла при различных температурах.

**В работе используются:**

1. Измеритель статических характеристик ИСХ1;
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03;
3. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

В отличие от металлов, в собственных полупроводниках при абсолютном нуле в зоне проводимости носители заряда отсутствуют. С повышением температуры число носителей значительно возрастает. Подвижность носителей в области низких температур из-за рассеяния на ионах примеси пропорциональна  $T^{3/2}$ . В области высоких температур основное значение имеет рассеяние на тепловых колебаниях решетки (фононах) и подвижность с ростом температуры уменьшается. Но так как концентрация свободных носителей заряда с ростом температуры увеличивается значительно быстрее, чем уменьшается подвижность, то сопротивление изменяется по закону

$$R_T = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (1)$$

где  $R_0$  – условное сопротивление полупроводника при  $T \rightarrow \infty$ ,  $\Delta E$  – энергия активации примеси (или ширина запрещенной зоны),  $k$  – постоянная Больцмана,  $B = \Delta E / 2k$  – коэффициент температурной чувствительности, который определяется структурой полупроводника и является характеристикой исследуемого материала.

Экспериментальные кривые  $\ln(R) = f(1/T)$  являются почти прямыми линиями (рис. 1).

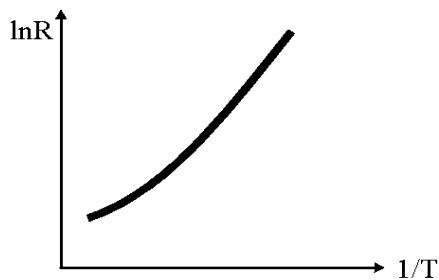


Рис. 1. Экспериментальная кривая  $\ln(R) = f(1/T)$

Статическая вольт-амперная характеристика полупроводникового образца имеет ярко выраженный нелинейный характер. Типичный ее вид показан на рис. 2. На ней можно выделить три основных участка: ОА, АВ, ВС. На участке ОА характеристика линейна, так как мощность, выделяющаяся в образце, мала и не изменяет его температуру. На участке АВ линейность нарушается, так как с повышением тока мощность рассеяния увеличивается, температура образца повышается, следовательно, сопротивление его уменьшается. При некотором значении тока кривая достигает максимума, и в небольшом интервале напряжение на образце остается постоянным, так как относительное увеличение тока становится равным вызванному им относительному понижению сопротивления. На участке ВС при дальнейшем увеличении тока уменьшение сопротивления оказывается столь сильным, что рост тока ведет к уменьшению напряжения на образце, и появляется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

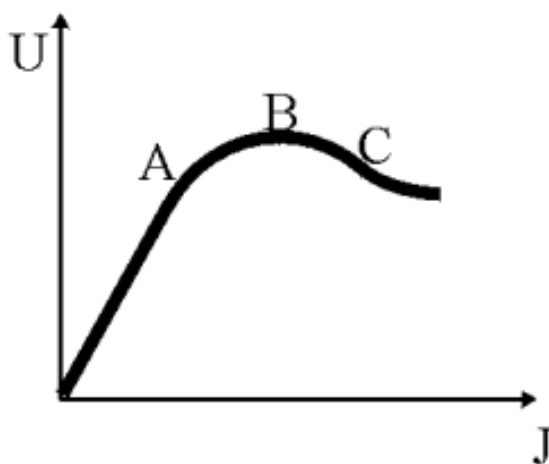


Рис. 2. Статическая вольт-амперная характеристика полупроводника.

Резкая зависимость сопротивления полупроводника от температуры используется для устройства большого класса полупроводниковых терморезисторов или термисторов. Малые габариты, высокая механическая прочность и надежность, большой срок службы и высокая чувствительность терморезисторов определили широкое применение их в приборах для измерения и регулирования температуры, температурной компенсации элементов электрических цепей, измерения мощности электромагнитного излучения и т.д.

### Описание установки

Исследование вольт-амперных характеристик полупроводникового образца производится с помощью модульного учебного комплекса МУК-ТТ2, состоящего из стенда с объектами исследования СЗ-ТТ03 (рис. 3) и измерителя статических характеристик ИСХ1 (рис. 5).

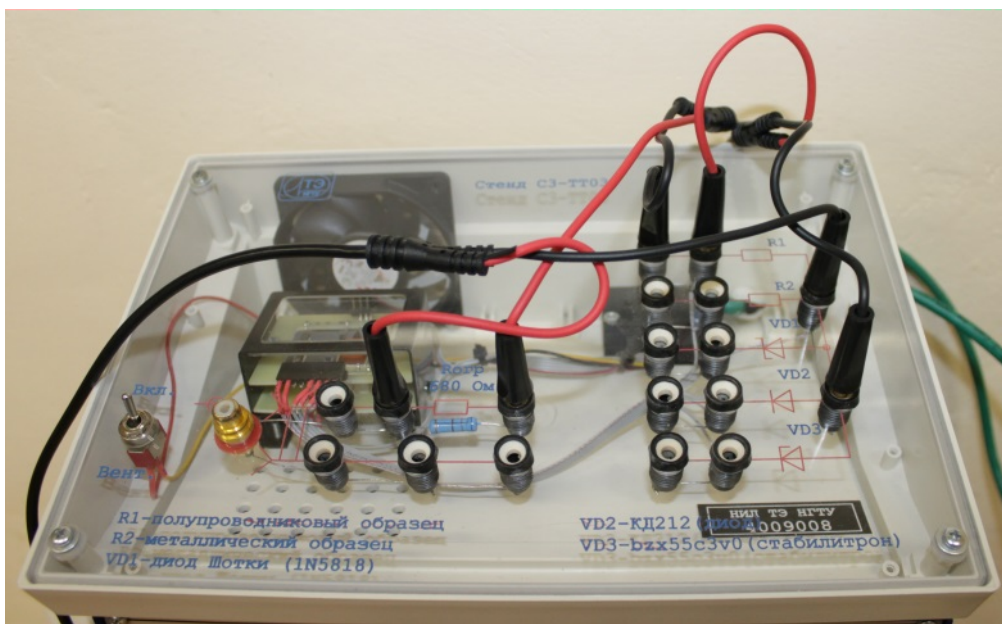


Рис. 3. Стенд СЗ-ТТ03.

Электрическая схема для проведения измерений представлена на рис. 4. Так как сопротивление полупроводника намного меньше внутреннего сопротивления канала измерителя ИСХ1, то прибор подключается параллельно измеряемому сопротивлению.

При нагревании сопротивление полупроводникового образца может уменьшиться в несколько раз, поэтому необходимо в схеме использовать ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$ .

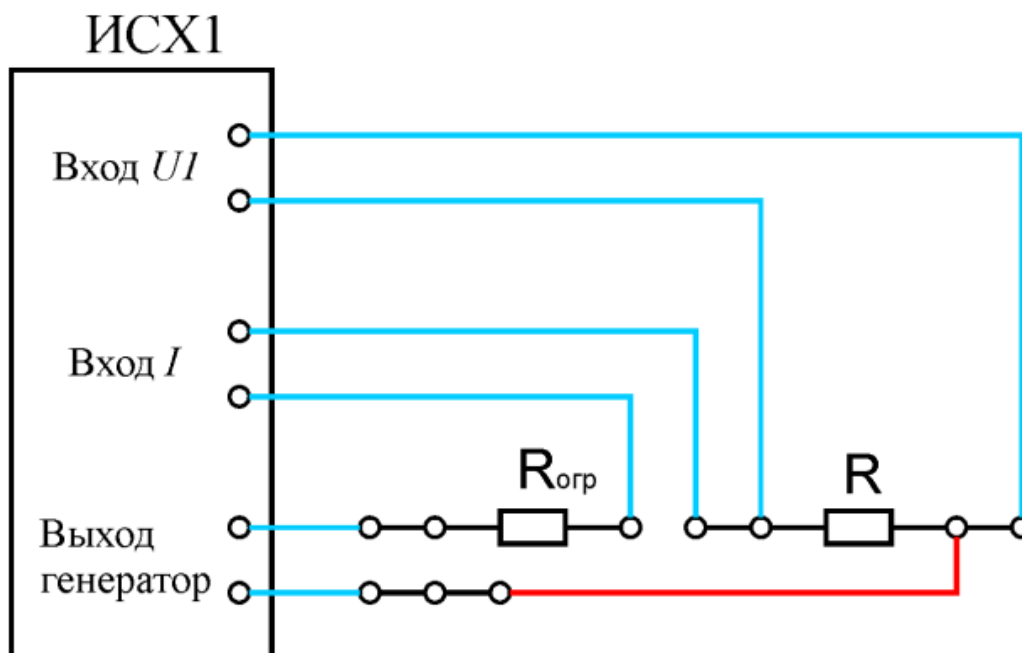


Рис. 4. Электрическая схема для проведения измерений

## Выполнение работы

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели).

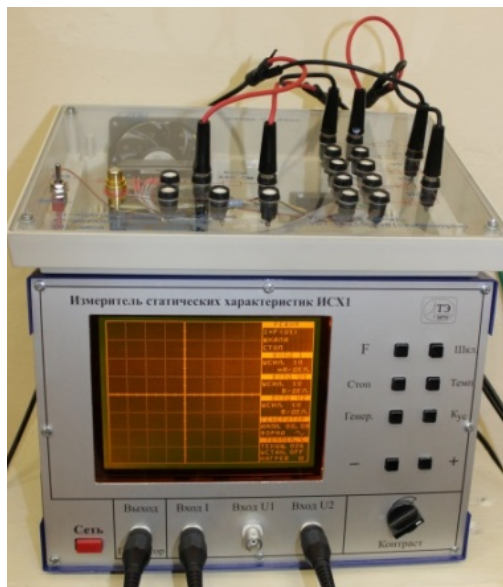


Рис. 5. Измеритель статических характеристик ИСХ1.

2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный). Для этого нужно нажать кнопку «Генер», в меню выбрать пункт «Форма» и с помощью кнопок «←» и «+» выбрать пилообразный сигнал.
3. Установите амплитуду выходного сигнала, используя кнопку « $K_{yc}$ ».
4. В меню «Режим» выберите функцию  $U_2=f(I)$  и получите на экране измерителя ВАХ полупроводникового элемента при температуре  $30^{\circ}\text{C}$ , установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $U_2$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C}$  и  $120^{\circ}\text{C}$ .

## Контрольные вопросы

1. Объясните механизм образования р-n-перехода. Почему на р-n-переходе возникает контактная разность потенциалов и от чего она зависит?
2. Какие физические процессы вызывают прохождение через диод прямого и обратного токов?
3. Нарисуйте и объясните энергетическую диаграмму р-n-перехода в отсутствие внешнего напряжения, при приложении напряжения в прямом и обратном направлении.
4. Объясните влияние температуры и концентрации примесей на толщину р-n-перехода и величину контактной разности потенциалов.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря, Г. Г. Основы физики полупроводников / Г. Г. Зегря, В. И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008. - 792 с.
6. Давыдов А.С. Теория твердого тела. / А.С. Давыдов. - М. : Наука, ГРФМЛ, 1976. -640 с.
7. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир, 1979.- 458 с.
8. Павлов П.В. Физика твердого тела. / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. / Дж. Займан. - М.: Мир, 2004 г.,-472 с.
10. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. / Дж Блейкмор. –М.: Мир, 2006 г.,- 608 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Исследование ВАХ диода при различных температурах

**Цель работы:** Исследовать ВАХ диода при различных температурах.

**В работе используются:**

1. Измеритель статических характеристик ИСХ1;
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03;
3. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор, состоящий из одного или нескольких  $p-n$  переходов и двух выводов. В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в  $p-n$  переходе различают следующие типы полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.

Низкоомный  $p$ -слой, содержащий много основных носителей тока, называют эмиттером, а более высокоомный  $n$ -слой называют базой. На рис. 1 представлены структуры планарно эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (контакт) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

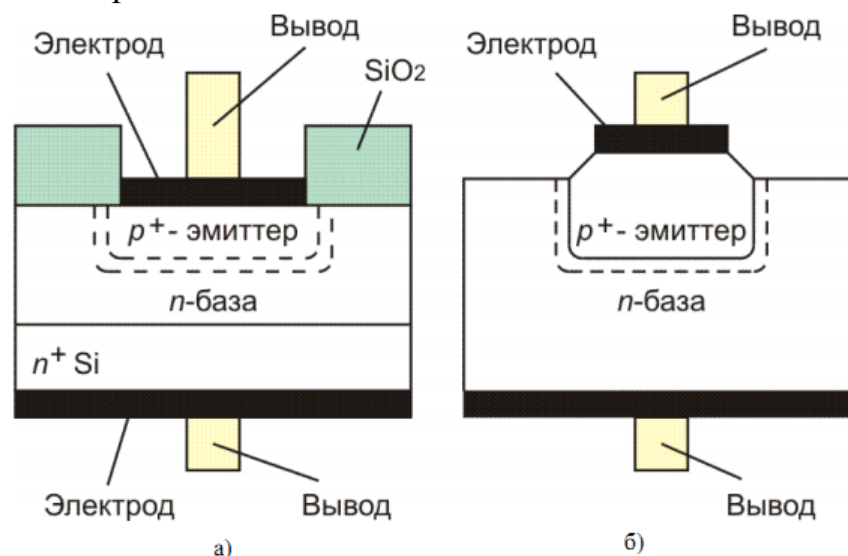


Рис. 1. Структуры планарно эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов.

Основной характеристикой полупроводниковых диодов является вольт-амперная характеристика (ВАХ). ВАХ представляет собой зависимость тока во внешней цепи  $p-n$  перехода от значения и полярности



прикладываемого к нему напряжения. Для идеального **p-n** перехода ВАХ описывается следующей зависимостью (пунктирная кривая на рис.2):

$$I = I_0(\exp(\frac{qU}{kT}) - 1), \quad (1)$$

где  $I_0$  – обратный (или тепловой ток);  $q$ –заряд электрона;  $k$ –постоянная Больцмана;  $T$ –абсолютная температура.

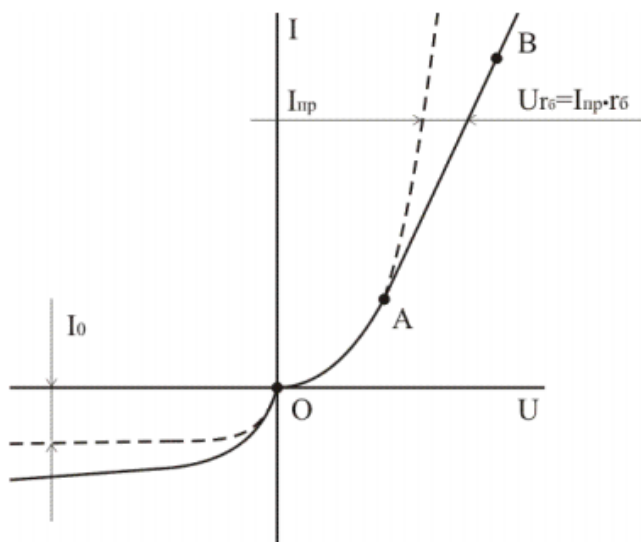


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика диода.

В прямом смещении ВАХ ( $U > 0$ ) реального диода (сплошная кривая на рис.2) близка к экспоненциальной только в начале зависимости - участок OA, а далее рост тока при увеличении прямого напряжения замедляется и характеристика становится более пологой - участок AB. Этот участок характеристики называют омическим, поскольку здесь оказывает влияние объемное сопротивление базы  $r_b$  **p-n** перехода. Ток, протекая через  $r_b$ , создает падение напряжения

$$U_{rб} = I_{np} r_b . \quad (2)$$

При этом внешнее напряжение не полностью падает на **p-n** переходе, а распределяется между ним и слоем базы. С учетом этого уравнения реальная ВАХ принимает вид:

$$I_{np} = I_0(\exp(\frac{q(U_{np} - r_b I_{np})}{kT}) - 1) . \quad (3)$$

Таким образом, влияние объемного сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ реального **p-n** перехода проявляется в виде смещения прямой ветви в сторону больших значений прямых напряжений. Поэтому, чем больше  $r_b$ , тем более полого идет прямая ветвь ВАХ реального перехода. Как правило, **p-n** переходы с большими значениями  $r_b$  выполняются для увеличения допустимого рабочего обратного напряжения на **p-n** переходе.

В области обратных напряжений можно пренебречь падением

напряжения в объёме полупроводника, т.к.  $r_б$  всегда много меньше сопротивления объемного заряда обратного смещенного перехода (за исключением области пробоя). Отличия реальной обратной ветви ВАХ ( $U < 0$ )  $p-n$  перехода от идеальной состоят в следующем: обратный ток реальной ВАХ растет при увеличении обратного напряжения  $p-n$  перехода и имеет значение, не равное  $I_0$ . Данная зависимость приведена на рис.2 (сплошная кривая). Это объясняется тем, что в реальном  $p-n$  переходе обратный ток содержит несколько составляющих:

$$I_{обр} = I_0 + I_{mг} + I_y, \quad (4)$$

где  $I_{mг}$  – ток термогенерации в области  $p-n$  перехода;  $I_y$  – ток утечки.

Ток термогенерации  $I_{mг}$  вызван тепловой генерацией носителей внутри  $p-n$  перехода. Он увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение  $p-n$  перехода.

Ток утечки  $I_y$  возникает в местах выхода  $p-n$  перехода на поверхность. При современной технологии изготовления  $p-n$  перехода  $I_y$  имеет незначительную величину.

### Температурная зависимость ВАХ

При увеличении температуры уменьшается контактная разность потенциалов, энергия основных носителей заряда возрастает, соответственно растет диффузионная составляющая тока и прямой ток увеличивается (рис. 3). Иначе говоря, при большей температуре  $p-n$  перехода тот же прямой ток достигается при меньшем смещении.

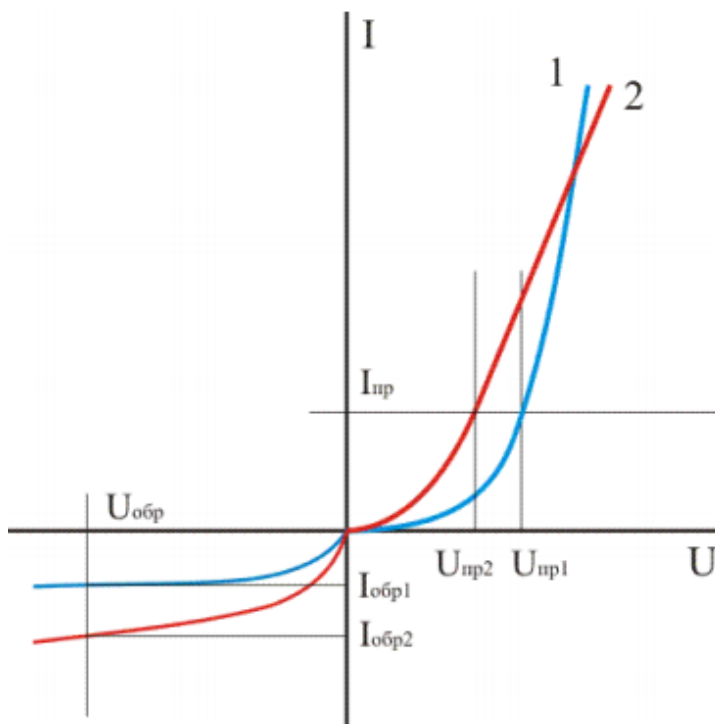


Рис. 3. ВАХ диода при двух различных температурах.

Для оценки влияния температуры вводится **температурный коэффициент напряжения прямой ветви**, под которым понимается величина, показывающая, на сколько изменится прямое напряжение для получения одной и той же величины прямого тока при изменении температуры на 1 градус.

При больших прямых токах нельзя пренебречь сопротивлением базы, которое с увеличением температуры растет из-за снижения подвижности свободных носителей заряда. Таким образом, результирующая ВАХ диода при прямом смещении сложным образом зависит от температуры. При малых токах характеристика смещается с ростом температуры влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) - вправо.

С ростом температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях **p-n** перехода. Это приводит к резкому возрастанию с температурой концентрации неосновных носителей в **n-** и **p-**областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения (рис.3 при  $U < 0$ ) и ухудшению выпрямляющих свойств диода.

Следует отметить, что при некоторой температуре концентрация основных носителей становится приближенно равной концентрации неосновных носителей, и переход исчезает совсем.

### **Зависимость ВАХ от материала полупроводника.**

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов представлены на рис. 4. Главная причина отличия ВАХ **p-n** переходов - это различное значение ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов. Чтобы появился прямой ток, необходимо уменьшить величину потенциального барьера. Для этого на **p-n** переход нужно подать прямое напряжение, близкое к значению контактной разности потенциалов  $\phi_k$ . В **p-n** переходе на основе германия  $\phi_k = (0,3 \div 0,4)$  В, в **p-n** переходе на основе кремния  $\phi_k = (0,6 \div 0,8)$  В. Поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого **p-n** перехода относительно германиевого смещается вправо на  $(0,3 \div 0,5)$  В. Следует отметить, что обратный ток кремниевых **p-n** переходов много меньше обратного тока германиевых **p-n** переходов. Это связано с различием ширины запрещенной зоны:  $\Delta W_{z_{Ge}} = 0,72$  эВ;  $\Delta W_{z_{Si}} = 1,12$  эВ.

Ток насыщения определяется в основном неосновными носителями заряда, имеющими место в примесном полупроводнике. Так, например, в полупроводнике **n**-типа это дырки, концентрация которых определяется в соответствии с законом действующих масс  $p_n = n_i^2 / n_n$ . Известно, что  $n_{i_{Ge}} = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, а  $n_{i_{Si}} = 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. При равной концентрации примеси получаем, что концентрация неосновных носителей заряда в кремниевом

полупроводнике на шесть порядков меньше, чем в германиевом примесном полупроводнике, поэтому ток  $I_0$  в кремниевом  $p-n$  переходе пренебрежимо мал.

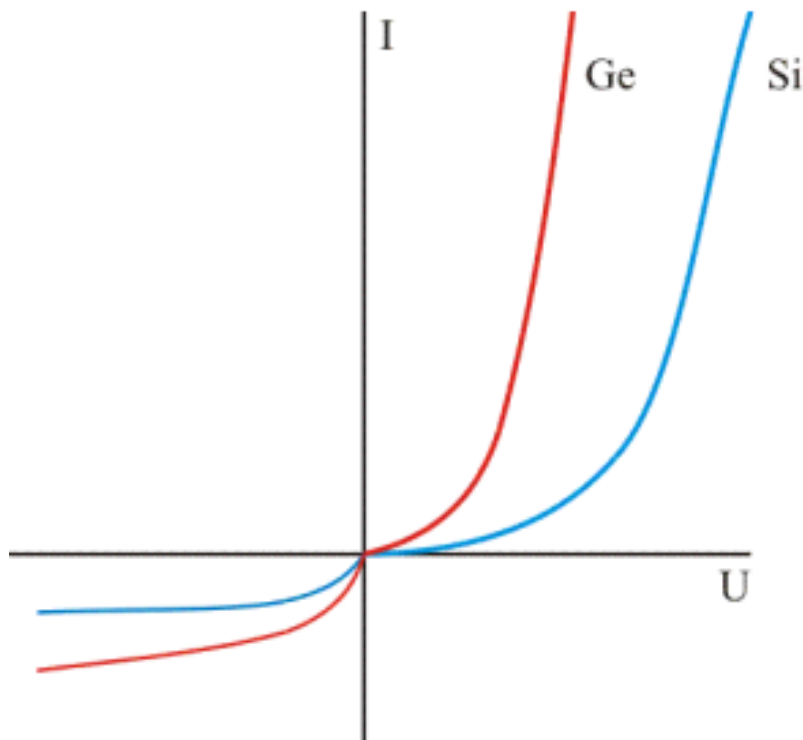


Рис. 4. ВАХ диодов на основе германия и кремния.

Обратный ток германиевого  $p-n$  перехода включает следующие составляющие:  $I_{обр Ge} \approx I_0 + I_y$ , а обратный ток кремниевого  $p-n$  перехода  $I_{обр Si} \approx I_{mz} + I_y$ . Для германиевых  $p-n$  переходов обратный ток в основном определяется током насыщения и имеет величину десятки микроампер. Ток термогенерации у них мал и им обычно пренебрегают. Незначительный наклон обратной ветви ВАХ германиевых  $p-n$  переходов обусловлен током утечки.

Обратный ток кремниевого  $p-n$  перехода примерно на три - четыре порядка меньше обратного тока германиевого перехода и определяется током термогенерации, т.е. дрейфовым током неосновных носителей, возникающих в результате тепловой генерации в самом  $p-n$  переходе. **Ток термогенерации** увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение  $p-n$  перехода. Ток термогенерации невелик из-за малого объема  $p-n$  перехода, ток утечки при современной технологии изготовления  $p-n$  перехода имеет незначительную величину. Отсюда в целом обратный ток кремниевого  $p-n$  перехода имеет небольшое значение, по сравнению с обратным током германиевых  $p-n$  переходов.

При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом диоде значительно меньше, чем в германиевом.

## Описание установки

Для измерения статических ВАХ полупроводниковых диодов имеет значение выбор схемы включения измерительных приборов. На рис. 5 представлены две возможные измерительные схемы.

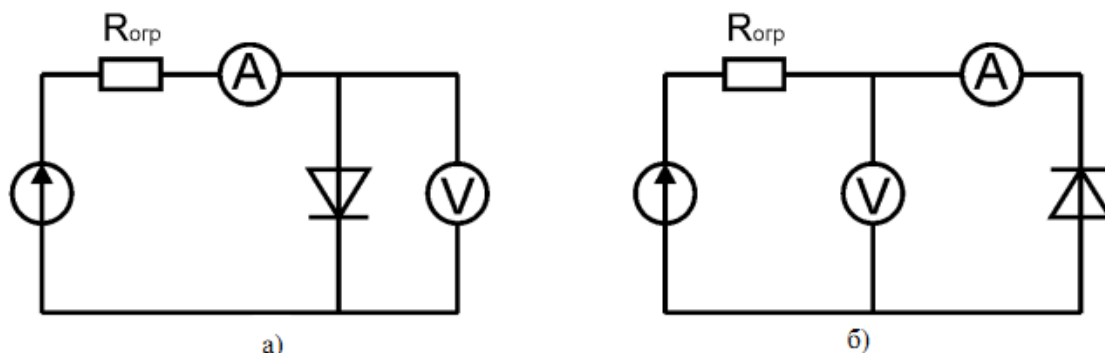


Рис. 5. Схемы включения полупроводникового диода.

Если внутренне сопротивление амперметра равно нулю, а внутреннее сопротивление вольтметра стремиться к бесконечности, то эти две схемы идентичны. При работе с реальными измерительными приборами эти условия не выполнимы.

Схему рис. 5а принято применять в случае, если внутреннее сопротивление вольтметра намного больше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в прямом смещении).

Схему рис. 5б принято применять в случае, если внутреннее сопротивление амперметра намного меньше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в обратном смещении).

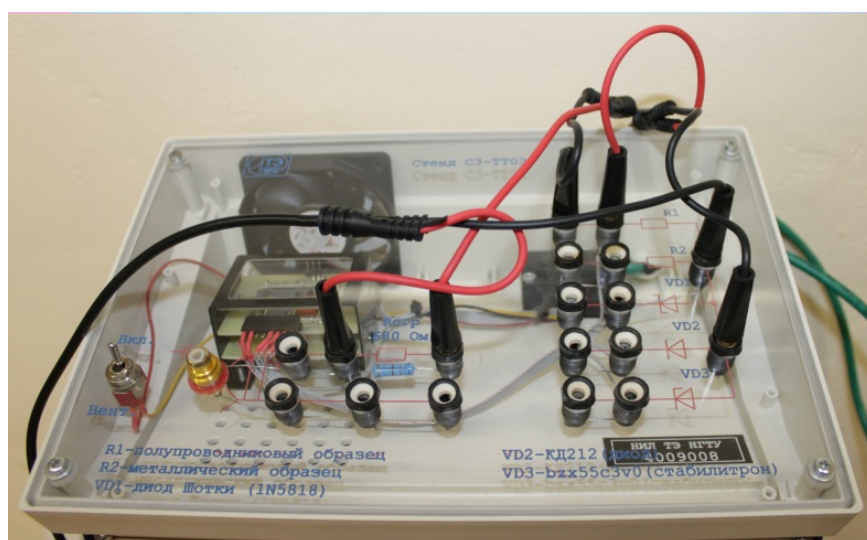


Рис. 6. Стенд СЗ-ТТ03

При составлении измерительной схемы очень важно правильно соблюсти полярность генератора и измерительных приборов, а так же

учесть их возможную электрическую связь друг с другом (гальванически развязаны, имеют общую «землю» или какое-то сопротивление связи). Исследование вольт-амперных характеристик диода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ТТ03 (рис. 6) и измерителя статических характеристик ИСХ1 (рис. 7). Он содержит в себе генератор испытательных сигналов, амперметр и два вольтметра.

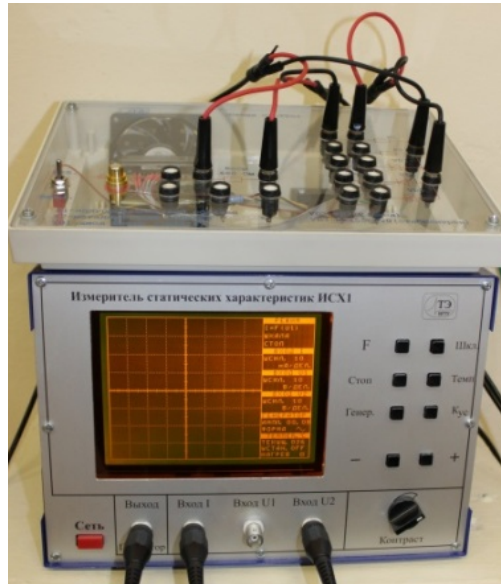


Рис. 7. Измеритель статических характеристик ИСХ1

Генератор напряжения и вольтметры имеют общую «землю», а амперметр имеет сопротивление связи 1 МОм. Входное сопротивление вольтметров составляет 1 МОм, а сопротивление амперметра (в диапазоне с масштабным коэффициентом 10 мА/дел.) составляет 3 Ом.

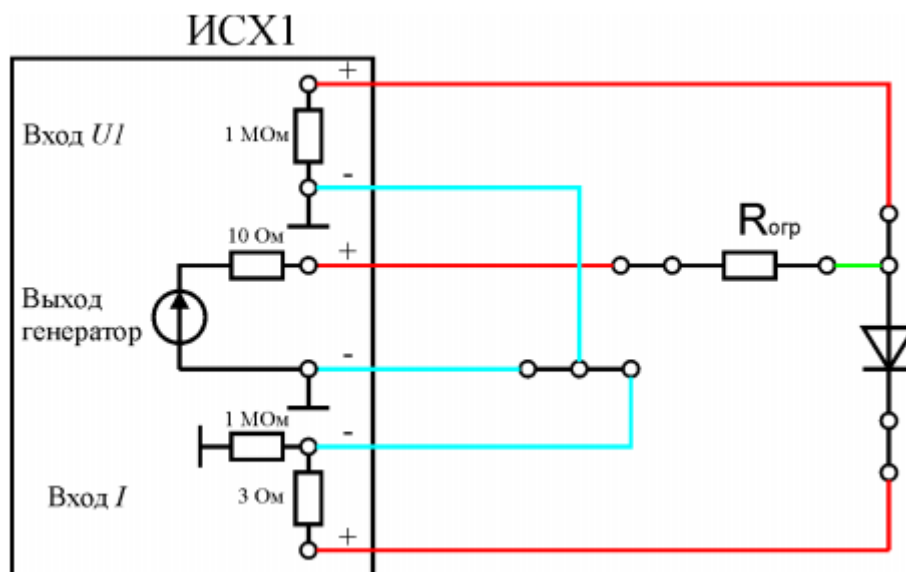


Рис. 8. Схема включения диода.

На экране измерителя ИСХ1 может отображаться одновременно ВАХ прямого и обратного смещения диода. По этой причине одна из характеристик в зависимости от выбора схемы включения будет отображаться с систематической погрешностью.

Рекомендуется для исследования диода выбрать схему для обратного смещения (рис. 8). В этом случае обратная ветвь будет отображаться корректно, а прямая - иметь ошибку определения падения напряжения на диоде не более 10%. Для тока 20 мА падение напряжения на внутреннем сопротивлении амперметра составляет  $3 \cdot 20 = 60$  мВ. При этом прямое смещение диода составляет 0,6-0,7 В.

Исследование обратной ветви ВАХ необходимо осуществлять при больших температурах, т. к. исследуемый кремниевый диод КД212 при напряжении 15 В и комнатной температуре имеет обратный ток менее 1 мкА.

## Выполнение работы

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели) и соберите электрическую схему рис.8.
2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный). Для этого нужно нажать кнопку «Генер», в меню выбрать пункт «Форма» и с помощью кнопок «-» и «+» выбрать пилообразный сигнал.
3. Установите амплитуду выходного сигнала, используя кнопку « $K_{yc}$ ».
4. В меню «Режим » выберите функцию  $U_2=f(I)$  и получите на экране измерителя ВАХ диода при температуре 30°C, установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $U_2$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах 60°C, 90°C и 120°C.

## Контрольные вопросы

1. Чем отличаются ВАХ германиевого и кремниевого выпрямительных диодов и почему?
2. Нарисуйте эквивалентную схему диода с  $p-n$ -переходом. Какой вид она будет иметь при большом обратном напряжении?
3. Пояснить физический смысл барьерной и диффузионной емкостей диода с  $p-n$ -переходом.
4. Какими физическими процессами обусловлен переходный процесс при переключении диода из пропускного в запирающее состояние?
5. Изобразить энергетическую диаграмму резкого анизотипного  $p-n$ -

гетероперехода. Основные области практического применения гетеропереходов.

6. При выполнении каких условий полупроводниковый диод может выполнять роль выпрямителя?

### Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря, Г. Г. Основы физики полупроводников / Г. Г. Зегря, В. И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008. - 792 с.
6. Давыдов А.С. Теория твердого тела. / А.С. Давыдов. - М. : Наука, ГРФМЛ, 1976. -640 с.
7. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир,1979.- 458 с.
8. Павлов П.В. Физика твердого тела. / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. / Дж. Займан. - М.: Мир, 2004 г.,-472 с.
10. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. / Дж Блейкмор. –М.: Мир, 2006 г.,- 608 с.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Исследование ВАХ диода Шоттки при различных температурах

**Цель работы:** Исследовать ВАХ диода Шоттки при различных температурах.

**В работе используются:**

1. Измеритель статических характеристик ИСХ1.
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03.
3. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Диод с барьером Шоттки состоит из перехода металл-полупроводник, системы контактов и корпуса. В диодах этого типа выпрямительный переход создается слоем металла (обычно золота, платины, алюминия или палладия), нанесенного на поверхность слаболегированного полупроводника. В диодах Шоттки предпочтительно использование полупроводника *n*-типа из-за более высокой подвижности электронов по сравнению с подвижностью дырок.

Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки имеет ярко выраженный несимметричный вид. Этот переход ведет себя аналогично диоду с *p-n* переходом. В области прямых смещений ток экспоненциально сильно растёт с ростом приложенного напряжения. В области обратных смещений ток от напряжения не зависит (рис. 1).

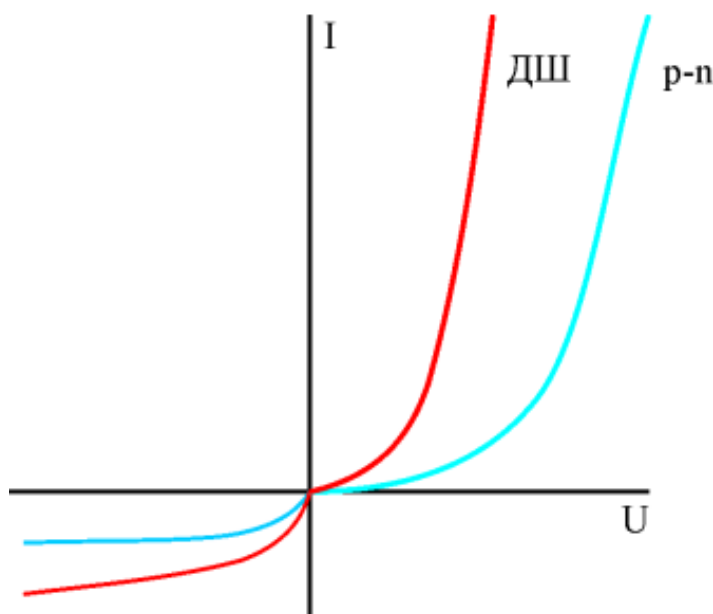


Рис. 1. Зависимости тока от напряжения диода Шоттки и диода с *p-n*-переходом.

При прямом и обратном смещении, ток в барьере Шоттки обусловлен основными носителями – электронами. Инжекция неосновных носителей в базу в таких диодах отсутствует. Ток образуется только электронами, движущимися из кремния в металл. По этой причине у диодов Шоттки отсутствует накопление зарядов в базе (отсутствуют рекомбинационные и диффузионные процессы) и время переключения значительно меньше, чем время переключения диода с *p-n* переходом.

Другая важная особенность барьера Шоттки – меньшее прямое напряжение, чем прямое напряжение кремниевого *p-n*-перехода при той же величине тока. Прямое напряжение кремниевых диодов Шоттки составляет  $0,2 \div 0,45$  В. Недостатком диодов Шоттки по сравнению с биполярными диодами является их больший обратный ток, а также меньшее напряжение пробоя. Обратный ток имеет экспоненциальную зависимость от температуры и возрастает при повышении обратного напряжения.

### Описание установки

Для измерения статических ВАХ полупроводниковых диодов имеет значение выбор схемы включения измерительных приборов. На рис. 2 представлены две возможные измерительные схемы.

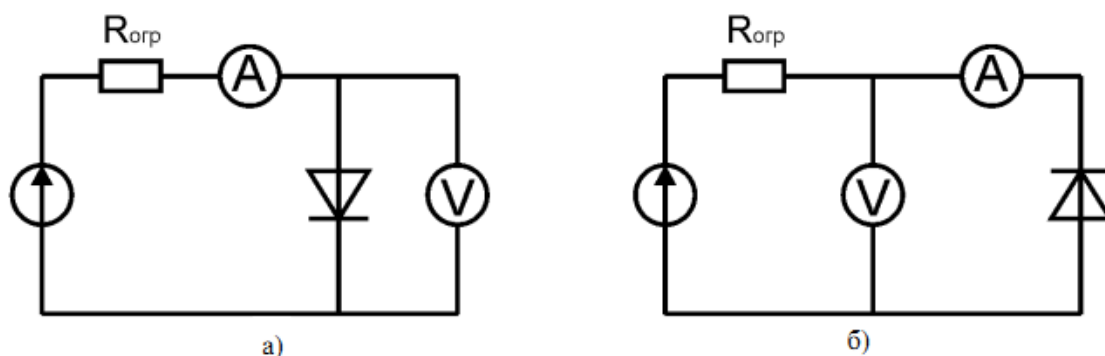


Рис. 2. Схемы включения полупроводникового диода.

Если внутреннее сопротивление амперметра равно нулю, а внутреннее сопротивление вольтметра стремиться к бесконечности, то эти две схемы идентичны. При работе с реальными измерительными приборами эти условия не выполнимы.

Схему рис. 2а принято применять в случае, если внутреннее сопротивление вольтметра намного больше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в прямом смещении).

Схему рис. 2б принято применять в случае, если внутреннее сопротивление амперметра намного меньше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в обратном смещении).

При составлении измерительной схемы очень важно правильно

соблюсти полярность генератора и измерительных приборов, а так же учесть их возможную электрическую связь друг с другом (гальванически развязаны, имеют общую «землю» или какое-то сопротивление связи). Исследование вольт-амперных характеристик диода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ТТ03(рис. 3)

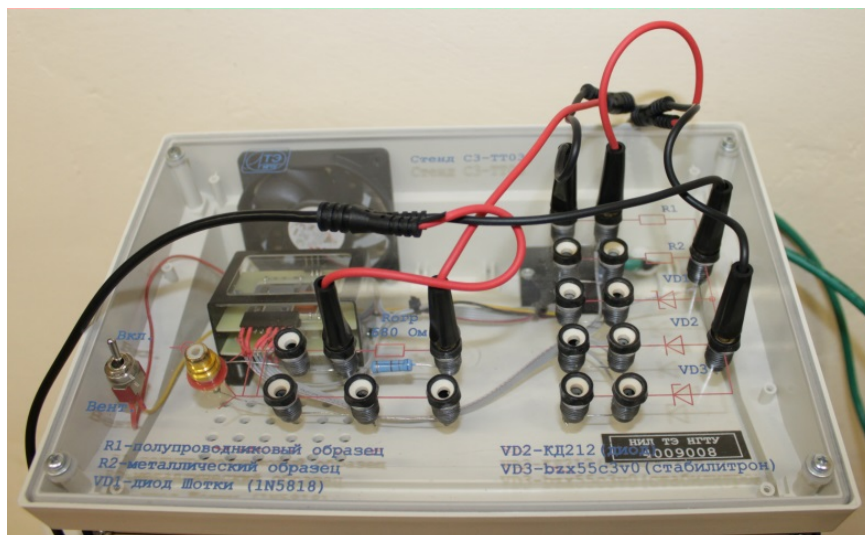


Рис. 3. Стенд СЗ-ТТ03.

и измерителя статических характеристик ИСХ1(рис. 4). Он содержит в себе генератор испытательных сигналов, амперметр и два вольтметра.

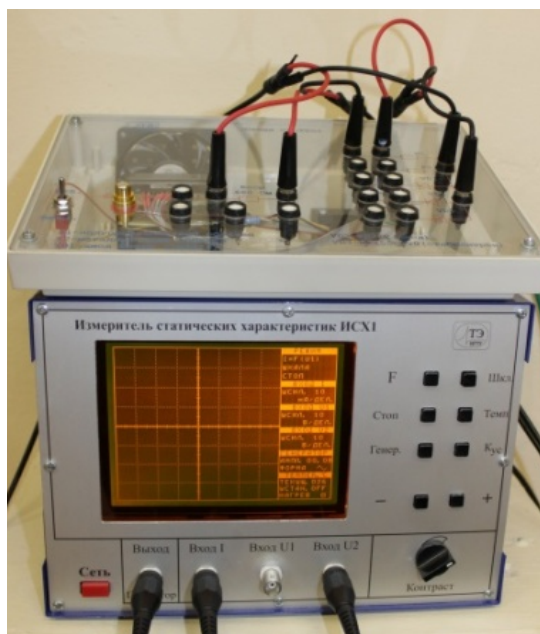


Рис. 4. Измеритель статических характеристик ИСХ1.

Генератор напряжения и вольтметры имеют общую «землю», а амперметр имеет сопротивление связи 1 МОм. Входное сопротивление вольтметров составляет 1 МОм, а сопротивление амперметра (в диапазоне

с масштабным коэффициентом 10 мА/дел.) составляет 3 Ом.

На экране измерителя ИСХ1 может отображаться одновременно ВАХ прямого и обратного смещения диода. По этой причине одна из характеристик в зависимости от выбора схемы включения будет отображаться с систематической погрешностью.

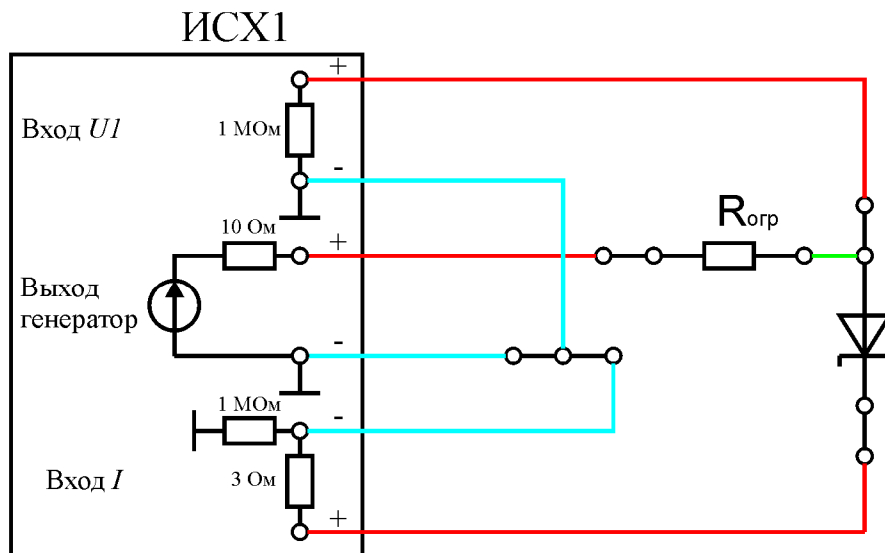


Рис. 5. Схема включения диода.

Рекомендуется для исследования диода выбрать схему для обратного смещения (рис. 5). В этом случае обратная ветвь будет отображаться корректно, а прямая - иметь ошибку определения падения напряжения на диоде не более 10%.

## Выполнение работы

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели) и соберите электрическую схему рис.5.
2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный). Для этого нужно нажать кнопку «Генер», в меню выбрать пункт «Форма» и с помощью кнопок «←» и «+» выбрать пилообразный сигнал.
3. Установите амплитуду выходного сигнала, используя кнопку «К<sub>ус</sub>».
4. В меню «Режим » выберите функцию  $U_2=f(I)$  и получите на экране измерителя ВАХ диода при температуре 30°C, установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $U_2$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах 60°C, 90°C и 120°C.
6. Сравните полученные ВАХ диода Шоттки с ВАХ диода на  $p-n$  переходе (предыдущая лабораторная работа).

## Контрольные вопросы

1. Нарисуйте энергетическую диаграмму запиорного слоя Шоттки при отсутствии и при наличии внешней разности потенциалов.
2. Какое уравнение надо решать для определения зависимости потенциальной энергии электрона от его координаты в области пространственного заряда запиорного слоя Шоттки? Запишите его.
3. Какой вид имеют зависимости ширины запиорного слоя и его ёмкости от напряжения?
4. Запишите выражение для ВАХ диода Шоттки и проанализируйте зависимость плотности тока от напряжения.
5. Нарисуйте эквивалентную схему диода Шоттки при наличии прямого и обратного напряжений.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря, Г. Г. Основы физики полупроводников / Г. Г. Зегря, В. И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008. - 792 с.
6. Давыдов А.С. Теория твердого тела. / А.С. Давыдов. - М. : Наука, ГРФМЛ, 1976. -640 с.
7. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир,1979.- 458 с.
8. Павлов П.В. Физика твердого тела. / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. / Дж. Займан. - М.: Мир, 2004 г.,-472 с.
10. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. / Дж Блейкмор. –М.: Мир, 2006 г.,- 608 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Исследование ВАХ стабилитрона при различных температурах

**Цель работы:** Исследовать ВАХ стабилитрона при различных температурах.

**В работе используются:**

1. Измеритель статических характеристик ИСХ1.
2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03.
3. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор, состоящий из одного или нескольких *p-n* переходов и двух выводов. В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в *p-n* переходе различают следующие типы полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.

Полупроводниковый стабилитрон предназначен для получения опорного (стабильного) напряжения. Этот прибор состоит из *p-n* перехода, системы контактов и корпуса.

Существует предел повышения запирающего напряжения на *p-n* переходе. Этот предел определяется пробоем *p-n* перехода. Начиная с некоторого значения напряжения обратный ток увеличивается медленно, а затем все быстрее и быстрее. Если не принимать специальных мер, то переход окажется пробитым. В области больших запирающих напряжений вольтамперные характеристики будут иметь вид одной из кривых, показанных на рис. 1.

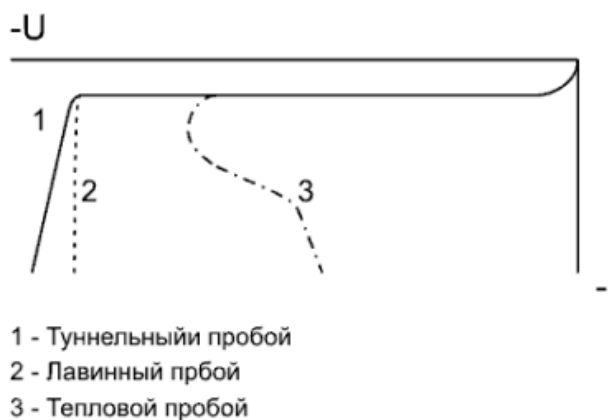


Рис. 1. Виды пробоя *p-n* перехода.

Различают четыре вида пробоя:

- туннельный пробой;
- лавинный пробой, или пробой за счет ударной ионизации;
- тепловой пробой за счет кумулятивного разогрева перехода;
- поверхностный пробой.

Туннельный (зенеровский) пробой является результатом непосредственного воздействия сильного электрического поля на кристаллическую решетку полупроводника. При сильном обратном смещении  $p$ - $n$  перехода можно создать условия для прямых электронных переходов между валентной зоной и зоной проводимости (туннелирования). Запрещенная зона при этом трактуется как область отрицательной кинетической энергии, в которой волновые функции быстро затухают. Вероятность перехода электрона через такой потенциальный барьер (с сохранением энергии) отлична от нуля, если с другой стороны барьера имеются состояния с равной или меньшей энергией. Эта вероятность имеет существенное значение только, при большой напряженности поля и малой ширине барьера. При этом образуются парные заряды электрон - дырка, увеличивающие ток через переход. Поэтому туннельный пробой будет характерен для узких (тонких) переходов.

Лавинный пробой возникает в том случае если неосновные носители, попадающие в поле области объемного заряда, приобретают энергию, достаточную для разрыва валентной связи. При столкновении с решеткой кристалла они выбивают из связи валентный электрон. В результате этого также возникает парный заряд, увеличивающий ток через переход. Для того чтобы носители заряда успели приобрести за время движения в переходе достаточную энергию, время их дрейфа должно быть относительно велико. Поэтому ударная ионизация наблюдается только в достаточно широких переходах, т. е. в переходах на относительно высокоомном материале.

Как в первом, так и во втором случае сопротивление перехода начинает падать, ток резко возрастает. Так как эти два случая являются предельными, то часто мы будем иметь дело с переходами, в которых будут действовать оба указанных механизма.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что как у сплавных, так и у диффузионных германиевых и кремниевых переходов туннельный пробой наблюдается в основном при удельных сопротивлениях менее  $0,1 \text{ Ом/см}$ . Напряжения туннельного пробоя составляют при этом менее  $2\text{В}$  для германиевых и менее  $5\text{В}$  для кремниевых переходов. Пробивные напряжения свыше  $7\text{В}$  для кремниевых и свыше  $5\text{В}$  для германиевых переходов соответствуют лавинному пробую. Промежуточные значения соответствуют одновременному существованию обоих видов пробоя. ВАХ для туннельного и лавинного пробоев оказываются довольно сходными, и практически не всегда можно с уверенностью сказать, какая из причин вызвала пробой.

Температурная зависимость напряжения туннельного пробоя будет определяться температурной зависимостью ширины *p-n* перехода. С ростом температуры уменьшается контактная разность потенциалов, уменьшается ширина *p-n* перехода, вероятность туннелирования возрастает, и напряжение пробоя падает.

Температурная зависимость напряжения лавинного пробоя зависит от температурной зависимости длины свободного пробега носителей тока. При рассеянии носителей на решетке подвижность носителей уменьшается. Поэтому для того, чтобы носитель при меньшей длине свободного пробега приобрел энергию, достаточную для ионизации валентных связей, поля в переходе должны иметь большую величину. Это приводит к тому, что напряжение пробоя будет увеличиваться с ростом температуры.

Таким образом, напряжения туннельного и лавинного пробоев имеют противоположные знаки изменения напряжения пробоя с изменением температуры  $\frac{dU_n}{dT}$ . Изменение знака происходит при концентрациях порядка  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В этой области ( $U_n = 5 \div 6 \text{ В}$ ) изменения напряжения пробоя с температурой будут минимальными.

Тепловой пробой может иметь место в тех случаях, когда не обеспечивается необходимый отвод тепла от перехода, работающего в режиме выпрямления больших токов.

Явление поверхностного пробоя заключается в следующем. Поверхностный заряд, имеющийся практически всегда на поверхности полупроводника в месте выхода *p-n* перехода на поверхность, может сильно исказить картину поля в переходе. Это в свою очередь повлияет на ширину перехода на поверхности и как следствие может увеличить вероятность пробоя.

## Описание установки

Для измерения статических ВАХ полупроводниковых диодов имеет значение выбор схемы включения измерительных приборов. На рис. 2 представлены две возможные измерительные схемы.

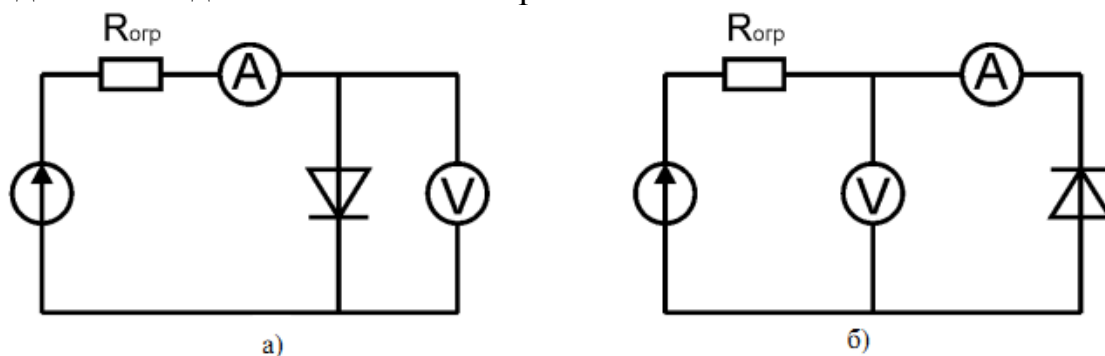


Рис. 2. Схемы включения полупроводникового диода.



Если внутреннее сопротивление амперметра равно нулю, а внутреннее сопротивление вольтметра стремится к бесконечности, то эти две схемы идентичны. При работе с реальными измерительными приборами эти условия не выполнимы.

Схему рис. 2а принято применять в случае, если внутреннее сопротивление вольтметра намного больше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в прямом смещении).

Схему рис. 2б принято применять в случае, если внутреннее сопротивление амперметра намного меньше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в обратном смещении).

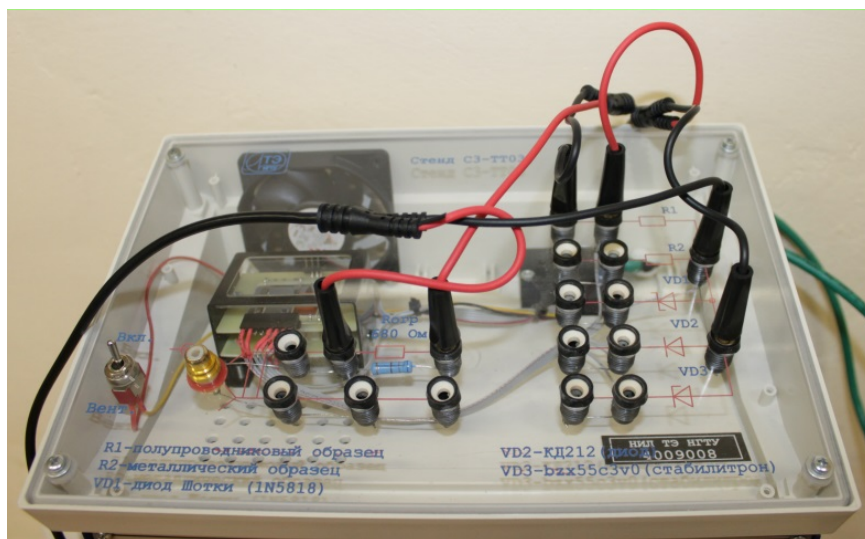


Рис. 3. Стенд СЗ-ТТ03

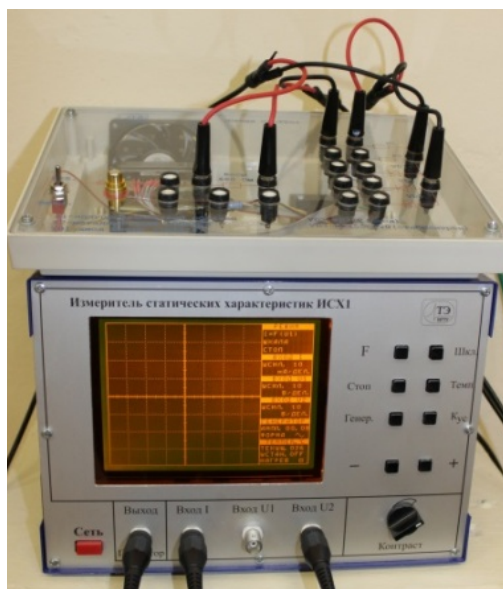


Рис. 4. Измеритель статических характеристик ИСХ1

При составлении измерительной схемы очень важно правильно соблюсти полярность генератора и измерительных приборов, а так же

учесть их возможную электрическую связь друг с другом (гальванически развязаны, имеют общую «землю» или какое-то сопротивление связи). Исследование вольт-амперных характеристик диода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ТТ03(рис. 3) и измерителя статических характеристик ИСХ1(рис. 4). Он содержит в себе генератор испытательных сигналов, амперметр и два вольтметра.

Генератор напряжения и вольтметры имеют общую «землю», а амперметр имеет сопротивление связи 1 МОм. Входное сопротивление вольтметров составляет 1 МОм, а сопротивление амперметра (в диапазоне с масштабным коэффициентом 10 мА/дел.) составляет 3 Ом.

На экране измерителя ИСХ1 может отображаться одновременно ВАХ прямого и обратного смещения диода. По этой причине одна из характеристик в зависимости от выбора схемы включения будет отображаться с систематической погрешностью.

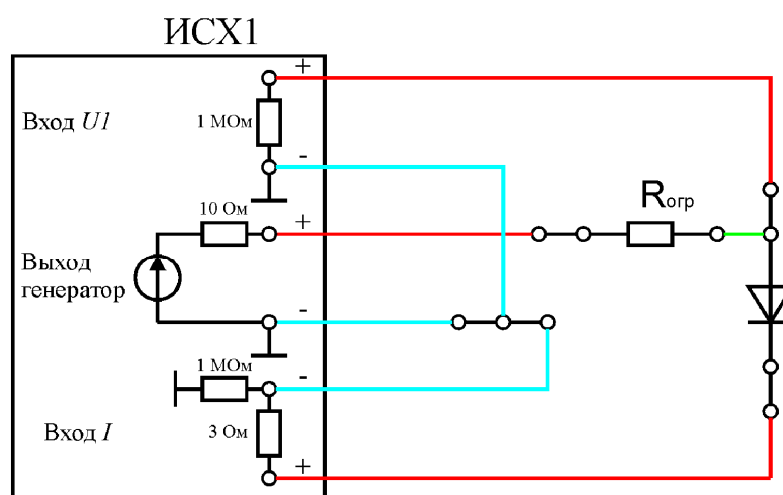


Рис. 5. Схема включения стабилитрона.

Рекомендуется для исследования стабилитрона выбрать схему для обратного смещения (рис. 5). В этом случае обратная ветвь будет отображаться корректно, а прямая - иметь ошибку определения падения напряжения на диоде не более 10%.

## Выполнение работы

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели) и соберите электрическую схему рис. 5.
2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный). Для этого нужно нажать кнопку «Генер», в меню выбрать пункт «Форма» и с помощью кнопок «←» и «+» выбрать пилообразный сигнал.
3. Установите амплитуду выходного сигнала, используя кнопку « $K_{yc}$ ».

4. В меню «Режим» выберите функцию  $U_2=f(I)$  и получите на экране измерителя ВАХ стабилитрона при температуре  $30^\circ\text{C}$ , установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $U_2$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах  $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  и  $120^\circ\text{C}$ .
6. Определите вид пробоя стабилитрона по знаку изменения напряжения пробоя с изменением температуры  $\frac{dU_n}{dT}$ .

## Контрольные вопросы

1. Какие особенности ВАХ исследованных полупроводниковых приборов определяют область их применения?
2. Какие виды пробоя существуют в p-n-переходе? Какие из них используются в полупроводниковом стабилитроне?
3. Объясните, что такое «рабочая точка» и «рабочий участок» ВАХ в полупроводниковых стабилитронах и стабилитронах.
4. Объясните, какие физические процессы определяют форму ВАХ стабилитрона на различных ее участках.
5. Объясните способ построения линии нагрузки. Как с ее помощью оценить качество стабилизации напряжения?
6. Рассмотрите простейшую схему стабилизатора напряжения. Объясните, как ведет себя линия нагрузки: если напряжение источника питания изменяется на величину  $\Delta E$  при постоянном сопротивлении нагрузки  $R_n$ ; если изменяется сопротивление нагрузки  $R_n$  при неизменном напряжении источника питания.
7. Объясните ВАХ туннельного диода с помощью энергетических диаграмм.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. - 392 с.

4. Зегря, Г. Г. Основы физики полупроводников / Г. Г. Зегря, В. И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008. - 792 с.
6. Давыдов А.С. Теория твердого тела. / А.С. Давыдов. - М. : Наука, ГРФМЛ, 1976. -640 с.
7. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т.1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин - М.: Мир,1979.- 458 с.
8. Павлов П.В. Физика твердого тела. / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
9. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. / Дж. Займан. - М.: Мир, 2004 г.,-472 с.
10. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. / Дж Блейкмор. –М.: Мир, 2006 г.,- 608 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

## Изучение работы p-n перехода

**Цель работы:** Изучить физические процессы в p-n переходе.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

#### ***P-n* переход и его энергетическая зонная диаграмма в состоянии равновесия**

*P-n* переход (рис. 1) представляет собой контакт двух областей полупроводника с различными типами проводимости (*n*- и *p*-типа).

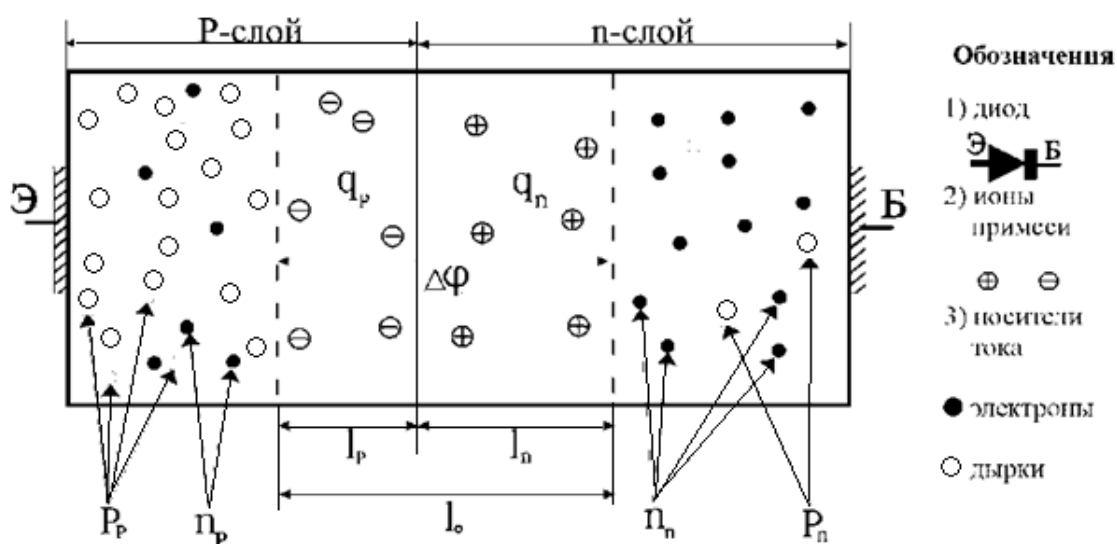


Рис. 1. Схема p-n-перехода.

Сечение полупроводника постоянно и настолько велико, что влияние поверхностных эффектов по сравнению с объемными несущественно. Между *n*- и *p*- областями находится переходная область шириной  $l_0 = l_p + l_n \sim 0,5$  мкм, в которой происходит изменение типа проводимости. Физические явления, происходящие в этой переходной области и прилегающих областях обеспечивают работу перехода и определяют связь между током через структуру и напряжением на контактах Э и Б.

Примем следующие обозначения: Концентрация основных носителей тока:  $P_p$ - дырки в *p*-слое,  $N_n$ - свободные электроны в *n*-слое. Концен-

трация неосновных носителей тока:  $N_p$ - свободные электроны в  $p$ -слое,  $P_n$ - дырки в  $n$ -слое. Диффузионные потоки:  $\Delta P_p$ - поток дырок из  $p$ -слоя,  $\Delta N_n$ - поток электронов из  $n$ -слоя. Дрейфовые потоки:  $\Delta N_p$ - поток электронов из  $p$ -слоя,  $\Delta P_n$ - поток дырок из  $n$ -слоя,  $\Delta \varphi_0$ - контактная разность потенциалов на  $p$ - $n$ -переходе. В рабочем диапазоне температур  $P_p \gg N_p$ , и  $N_n \gg P_n$ .

Рассмотрим несимметричный  $p$ - $n$ -переход, при котором концентрация акцепторов  $N_A$  и концентрация доноров  $N_D$  неодинаковы. Такой переход обычно формируют в полупроводниковых диодах. Например, пусть  $N_A = 100 - 1000 N_D$ . Тогда при активации примеси  $P_p \gg N_n$ . Низкоомный  $p$ -слой, содержащий много основных носителей тока, называют эмиттером (Э), а более высокоомный  $n$ -слой называют базой (Б).

Из «закона действующих масс» следует, что  $P_p N_p = N_n P_n$ . Так как  $P_p \gg N_n$ , то  $P_n \gg N_p$ . Общее соотношение концентраций носителей тока  $P_p \gg N_n \gg P_n \gg N_p$ .

На границе между  $p$ -слоем и  $n$ -слоем имеется большая разность концентрации и дырок, и свободных электронов. Вследствие теплового движения этих частиц происходит спонтанный процесс диффузии и дырок, и электронов через границу между слоями.

Диффузионный поток  $\Delta P_p$  дырок из  $p$ -слоя, проходя в  $n$ -слой, на участке  $l_n$  встречается со свободными электронами. Процесс рекомбинации уничтожает эти носители тока. Остаются донорные ионы, создающие объемный заряд  $q_n = q_e N_D l_n S$ , где  $S$ -площадь поперечного сечения полупроводника. Аналогично после рекомбинации диффузионного потока  $\Delta N_n$  электронов из  $n$ -слоя и дырок  $p$ -слоя на участке  $l_p$  этого слоя остаются акцепторные ионы, создающие заряд  $q_p = -q_e N_A l_p S$ . Так образуется  $p$ - $n$  переход шириной  $l_o = l_p + l_n$ , лишенный носителей тока и содержащий объемные заряды ионов  $q_p$  и  $q_n$ . Он обладает очень большим сопротивлением.

Так как,  $q_p = q_n$  то  $N_A l_p = N_D l_n$ . При несимметричном  $p$ - $n$  переходе ( $N_A \gg N_D$ ) имеем  $l_p \ll l_n$ . Таким образом  $l_o \sim l_n$  и  $p$ - $n$  переход размещен в основном в высокоомной базе.

При некоторой постоянной температуре  $p$ -слой,  $n$ -слой и переход между ними приходят в состояние равновесия. Особенность этого состояния рассматриваемой системы определяется тем, что для всего объема полупроводника в равновесном состоянии уровень Ферми  $E_f$  имеет одинаковое значение. Исходя из этого «принципа горизонтальности уровня Ферми» строится энергетическая зонная диаграмма системы, показанная на рис. 2. При построении ее учитывается, что в  $p$ -слое уровень Ферми всегда находится вблизи валентной зоны, а в  $n$ -слое он расположен вблизи зоны проводимости.

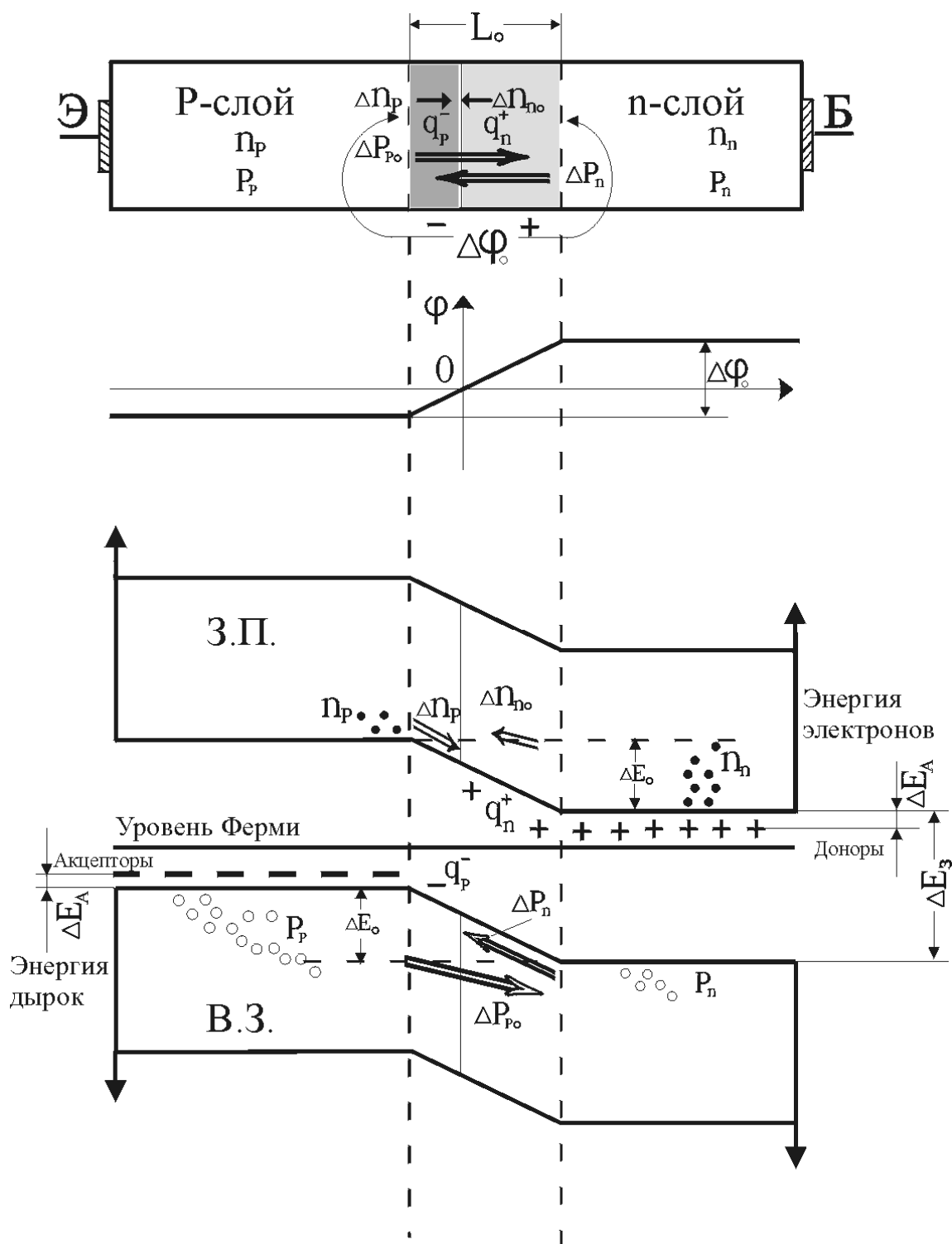


Рис. 2. Зонная диаграмма p-n-перехода в равновесном состоянии.

Относительно «горизонтального», общего для всего объема уровня Ферми, строятся валентная зона и зона проводимости, которые в области p-n-перехода оказываются «наклонными».

«Наклонная» В.З. для дырок p-слоя создает при их переходе в n-слой потенциальный барьер  $\Delta E_0$ . Такой же барьер в ЗП создается для электронов n-слоя. Энергия дырок на диаграмме увеличивается «вниз», а

электронов - «вверх». Переход дырок из р-слоя в п-слой требует увеличения их энергии. Дырки же п-слоя, оказавшиеся у границы р-п перехода, беспрепятственно, уменьшая свою энергию, направлены движутся (дрейфуют) в р-слой.

Потенциальный барьер определяется в равновесном состоянии контактной разностью потенциалов  $\Delta\varphi_0$ , создаваемой объемными зарядами  $q_p$  и  $q_n$  ионов в р-п переходе. Высота барьера  $\Delta E_0 = q_e \Delta\varphi_0$ , ширина (р-п-перехода)  $l_0 = \sqrt{\Delta\varphi_0}$ .

Так как дырочный газ в валентной зоне - невырожденный, его концентрация при  $T=\text{const}$  распределяется по закону Больцмана

$$P_n = P_p e^{-\frac{\Delta E_0}{kT}}$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Следовательно, равновесная концентрация дырок  $P_p$  в р-слое и  $P_n$  в п-слое неодинакова. Из предыдущей формулы получим

$$\Delta E = kT \ln \frac{P_p}{P_n}, \quad (1)$$

при  $T=300\text{K}$ ,  $\Delta E_0 \sim 0,35\text{эВ}$ , ( $\Delta\varphi_0 = 0,35\text{В}$ ) для *Ge* и  $\Delta E_0 \sim 0,65\text{эВ}$  ( $\Delta\varphi_0 \sim 0,65\text{В}$ ) для *Si*.

В равновесном состоянии вследствие  $P_p \gg P_n$  диффузионный поток дырок  $\Delta P_{p0}$  не исчезает, но компенсируется встречно направленным дрейфовым потоком  $\Delta P_n$  дырок:  $\Delta P_{p0} = \Delta P_n$ . Величина дрейфового потока не зависит от потенциального барьера  $\Delta E_0$ , но определяется концентрацией  $P_n$  дырок - неосновных носителей тока в п-слое. Она существенно зависит от температуры полупроводника. При постоянной температуре  $\Delta P_n = \text{const}$ .

Для зоны проводимости картина диффузионного и дрейфового потоков электронов аналогична рассмотренной. Ввиду малости этих потоков при несимметричном р-п переходе в дальнейшем их можно не рассматривать.

### Прямое смещение р-п перехода

Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  на границах р-п перехода можно изменять относительно «контактной» разности потенциалов  $\Delta\varphi_0$  с помощью внешнего напряжения, подаваемого на клеммы Э и Б полупроводниковой системы.

Если напряжение  $U$  приложено так, что  $\Delta\varphi < \Delta\varphi_0$ , оно называется напряжением «прямого смещения» р-п перехода или прямым напряжением на полупроводниковом диоде. В рассматриваемом здесь случае полярность прямого напряжения должна иметь «плюс» на Э и «минус» на Б.



При прямом смещении р-п перехода по сравнению с равновесными значениями уменьшаются разность потенциалов  $\Delta\varphi$ , высота  $\Delta E$  и ширина  $l$  потенциального барьера.

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - U \\ \Delta E = \Delta\varphi_0 - \Delta E_0 - q_e U \\ l = l_0 \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_0}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{U}{\Delta\varphi_0}} \end{cases} \quad (2)$$

а также на  $\Delta E_p = q_e U$  уровень Ферми  $E_{Fn}$  в  $n$ -слое смещается «вверх» на зонной диаграмме относительно уровня Ферми  $E_{Fp}$  в  $p$ -слое. Неравенство  $E_{Fn} > E_{Fp}$  означает, что система прямым напряжением  $U$  выведена из состояния равновесия при неизменной температуре. Такой процесс «энергетического смещения» при  $T = const$  сохраняет в  $p$ -слое и в  $n$ -слое равновесное положение валентной зоны ВЗ и зоны проводимости ЗП относительно соответствующего уровня Ферми. На зонной диаграмме ВЗ и ЗП в  $n$ -слое вместе с  $E_{Fn}$  смещается «вверх», как это показано на рис.3. При «прямом смещении» и при  $T = const$  концентрация неосновных носителей - дырок в  $n$ -слое  $P_n$  и дрейфовый поток  $\Delta P_n$  дырок из  $n$ -слоя практически остаются такими же, как и в состоянии равновесия.

Диффузионный же поток дырок  $\Delta P_p$  из  $p$ -слоя, зависящий от высоты  $\Delta E$  барьера, существенно возрастает по сравнению с равновесным значением:  $\Delta P_p \gg \Delta P_{p0}$ . В  $n$ -слое за счет этого потока появляются «избыточные неосновные носители тока» - дырки. Этот процесс нагнетания из эмиттера в базу неосновных носителей называют инжекцией. На границе  $p$ - $n$  перехода ( $x=0$  на рис.3) концентрация «избыточного дырок»  $\Delta P_0 = \Delta P_p - \Delta P_n$  максимальна. Эти дырки диффундируют в  $n$ -слое и по причине рекомбинации с имеющимися в этом слое свободными электронами уменьшают свою концентрацию по закону

$$\Delta P(x) = \Delta P_0 e^{-\frac{x}{L}} = P_0 \left( e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{x}{L}} \quad (3)$$

где  $L \sim 0,1$  мм - «диффузионная длина» дырок в  $n$ -слое, при которой  $\Delta P(x=L) < \Delta P_0$  в  $e = 2,7$  раз,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Рекомбинационное уменьшение свободных электронов в  $n$ -слое компенсируется их притоком из внешней цепи под действием источника «прямого» напряжения. Соответственно инжекция дырок из эмиттера в  $p$ -слое компенсируется оттоком электронов во внешнюю цепь, что эквивалентно притоку дырок из этой цепи.

Диффузионный дырочный ток на границе ( $x=0$  на рис. 3)  $p$ - $n$  перехода с  $n$ -слоем определяется законом диффузии

$$I = q_e D_p S \left. \frac{d(\Delta P(x))}{dx} \right|_{x=0}, \quad (4)$$

где  $D_p$  - коэффициент диффузии дырок в n-слое.

Подставляя  $\Delta P(x)$  из (3) и находя производную, получим при  $x=0$  формулу прямого тока через p-n переход

$$I = I_{op} \left( e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) \quad (5)$$

300 К для *Ge*  $I \sim 1$  мкА, для *Si*  $I \sim 10^{-7}$  мкА

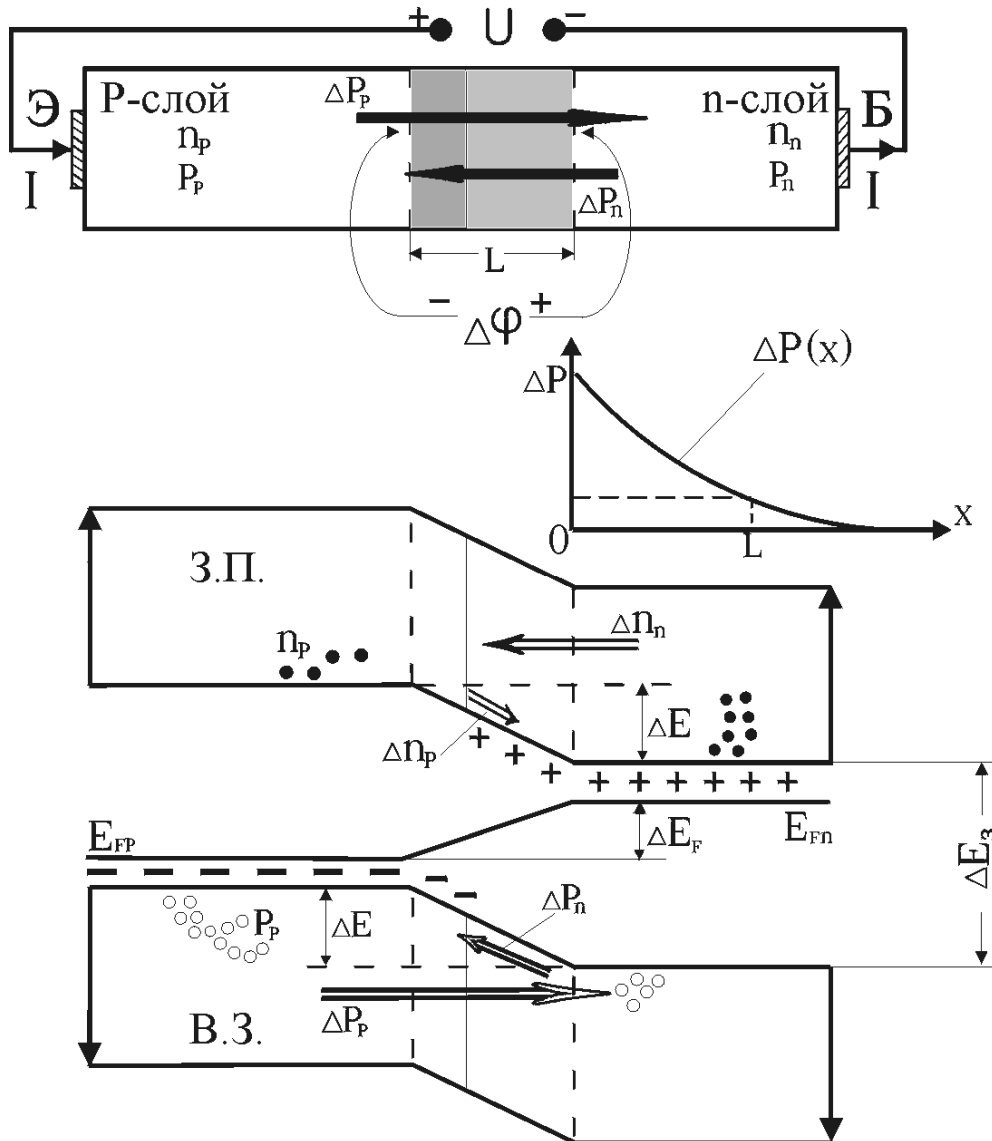


Рис. 3. Зонная диаграмма p-n-перехода при прямом смещении.

Прямое напряжение смещения, исходя из требования  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + U' > 0$ , ограничивается условием  $U < \Delta\varphi_0$ . Прямой ток нормируется по допустимой мощности, выделяющейся при нагревании полупроводника, и для диодов средней мощности  $I \sim 0,5$  А. Так как ширина  $l$  p-n перехода при прямом смещении мала, его сопротивление незначительно.

Примечание: Если р-п переход симметричный, аналогичным образом рассматриваются электронные потоки в зоне проводимости, инжекция электронов из п-слоя, диффузионный электронный ток, соответствующий формуле (4), но содержащий тепловой ток электронов  $I_{on}$ . Прямой ток является суммой дырочного и электронного токов.

### Обратное смещение р-п перехода

Напряжение смещения  $U'$  называют обратным напряжением, если оно приложено к клеммам Э и Б так, что  $\Delta\varphi > \Delta\varphi_0$ . На рис.4 полярность этого напряжения имеет «плюс» на Б и «минус» на Э.

При обратном смещении р-п перехода возрастают по сравнению с равновесными значениями разность потенциалов, высота и ширина потенциального барьера

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \Delta\varphi_0 + U' \\ \Delta E = q_e \Delta\varphi = \Delta E_0 - q_e U' \\ l = l_0 \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_0}} = l_0 \sqrt{1 - \frac{U'}{\Delta\varphi_0}} \end{cases}, \quad (6)$$

а также на  $\Delta E_f = q_e U'$  смещается «вниз» на зонной диаграмме уровень Ферми  $E_{Fn}$  относительно уровня Ферми  $E_{Fp}$ . Напряжением  $U'$  система выведена из состояния равновесия ( $E_{Fn} < E_{Fp}$ ) при неизменной температуре. Равновесные значения концентрации основных и неосновных носителей тока в р-слое и в п-слое сохраняются. Неизменным остается и положение ВЗ и ЗП относительно уровней Ферми в каждом слое. Вместе с уровнем Ферми смещаются «вниз» относительно р-слоя ВЗ и ЗП п-слоя, как показано на зонной диаграмме (рис. 4).

При обратном смещении и при  $T = const$  дрейфовый поток  $\Delta P_n$  дырок из п-слоя остается таким же, как и в состоянии равновесия.

Диффузионный же поток дырок  $\Delta P_p$  из р-слоя ввиду увеличения высоты  $\Delta E$  потенциального барьера ( $\Delta E > \Delta E_0$ ) существенно уменьшается по сравнению с равновесным значением:  $\Delta P_p \ll \Delta P_{p0}$ .

Преимущественный дрейфовый переход дырок из п-слоя в р-слой (экстракция, или отсос дырок из базы) создает в п-слое вблизи его границы с р-п переходом «дефицит дырок», распространяющийся по мере удаления от границы (вдоль оси X) в соответствии с формулой

$$\Delta P'(x) = \Delta P'_0 e^{-\frac{x}{L}} = P_n \left( e^{-\frac{q_e U'}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{x}{L}}, \quad (7)$$

где максимальное значение «дефицита» (при  $x=0$ )  $\Delta P'_0 = \Delta P_p - \Delta P_n < 0$

Дырки, покидающие п-слой, компенсируются притоком их из глубины п-слоя, что эквивалентно оттоку свободных электронов во

внешнюю цепь через клемму  $B$ . В  $p$ -слое сверхравновесные дырки, проникшие через  $p$ - $n$  переход, компенсируются рекомбинацией их с электронами, поступающими из внешней цепи через клемму  $\mathcal{E}$ .

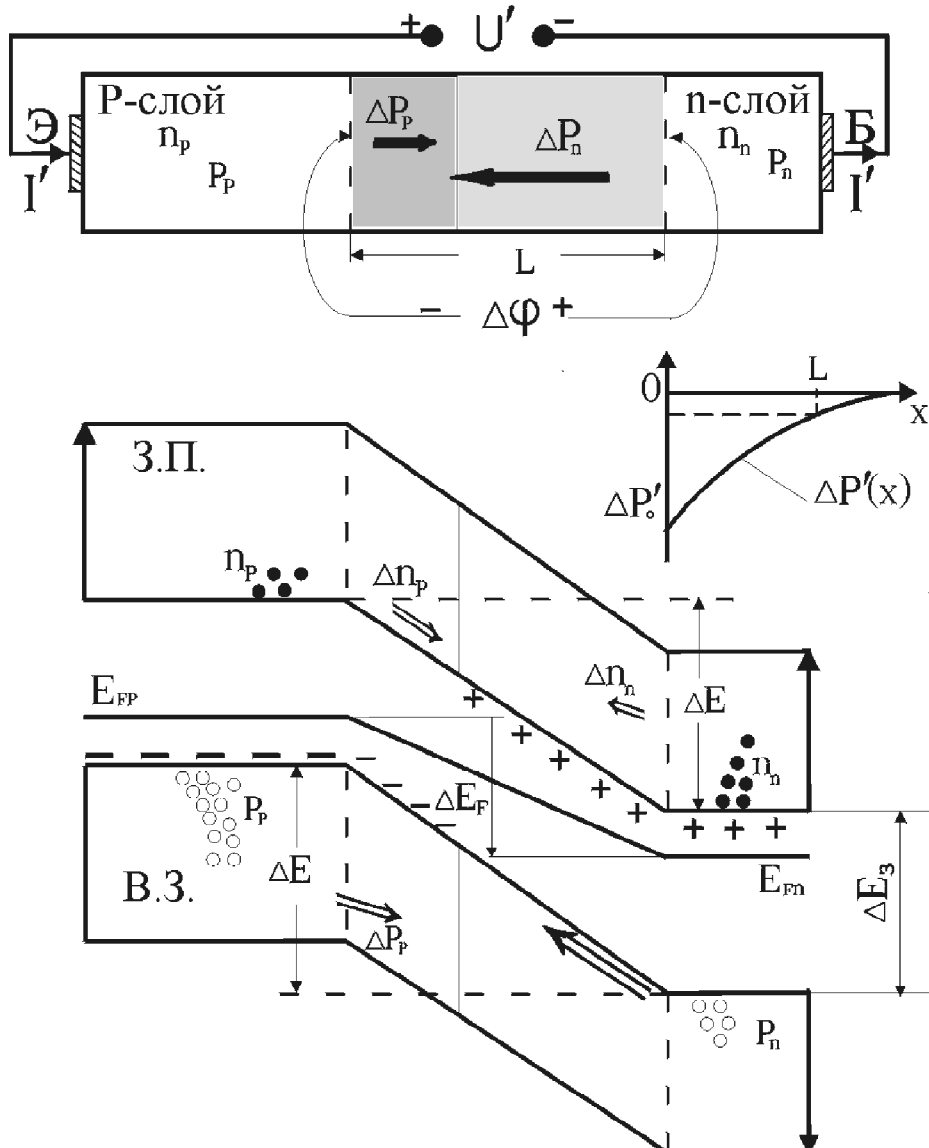


Рис. 4. Зонная диаграмма  $p$ - $n$ -перехода при прямом смещении.

Дрейфовый дырочный ток на границе  $p$ - $n$  перехода с  $n$ -слоем определяется формулой (4), подставляя в которую (7), получим для обратного тока через  $p$ - $n$  переход

$$I' = I_{op} \left( e^{-\frac{qeU'}{kT}} - 1 \right), \quad (8)$$

где тепловой дырочный ток  $I_{op}$  соответствует рассмотренному в (5). Обратное напряжение  $U'$  ограничивается электрической прочностью кристалла и может быть достаточно большим (30–100В). Даже при не очень больших напряжениях  $U'$  в (8) экспоненциальная часть много меньше единицы и ею можно пренебречь. Поэтому  $I' \sim I_{op} = const$  при

данной температуре и разных значениях  $U' \gg 0$ . Температурная зависимость тока  $I'$  весьма существенна.

Ввиду большого значения ширины  $l$  р-п перехода сопротивление обратного смещенного перехода очень большое.

### Описание установки

Исследовать свойства р-п перехода можно с помощью полупроводникового диода. Полупроводниковым диодом называется электронный прибор, который состоит из р-п перехода, системы контактов и корпуса.

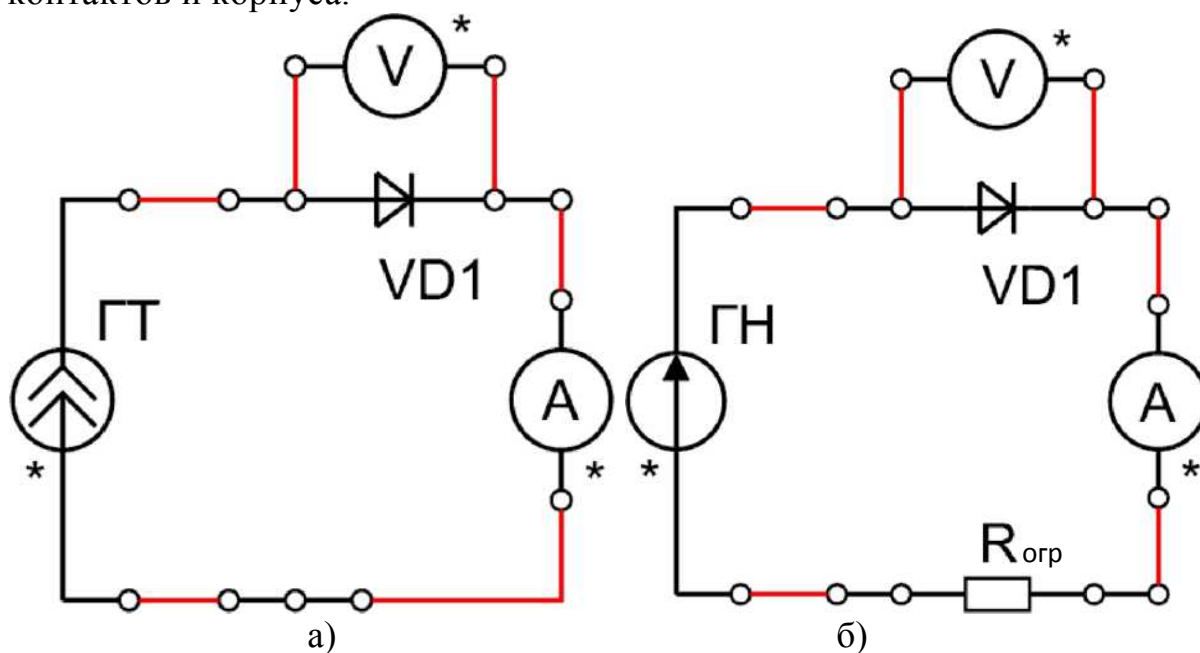


Рис. 5. Схема подключения для измерения ВАХ в прямом направлении с использованием а) «генератора тока», б) гасящего сопротивления.

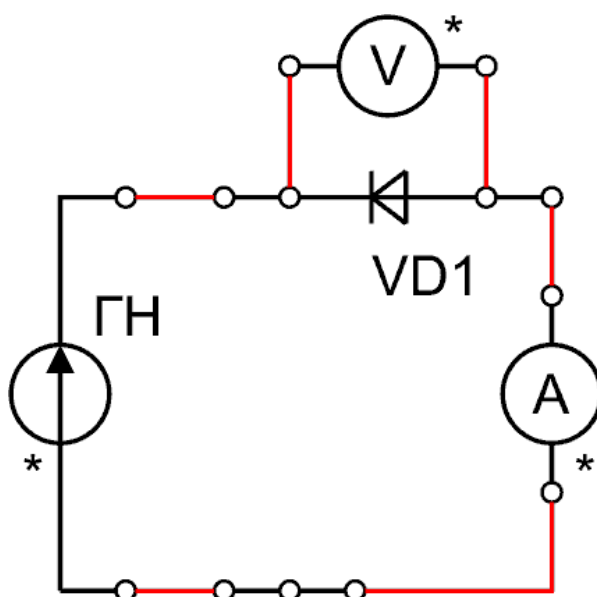


Рис. 6. Схема подключения для измерения ВАХ в обратном направлении.

Формулы (5) и (8) определяют вольт-амперные характеристик (ВАХ) полупроводникового диода при прямом  $I = f(U)$  и при обратном  $I' = f(U')$  смещениях.

В первом случае ВАХ имеет большую крутизну: при малом изменении прямого напряжения ток диода изменяется резко. Для экспериментального исследования ВАХ в этом случае проще и точнее устанавливать величину тока, а напряжение, полученное на диоде, измерять. Для этого в качестве источника необходимо применять либо «генератор тока» (рис. 5а), либо гасящее сопротивление (рис. 5б).

ВАХ при обратном включении диода: даже при больших изменениях напряжения ток изменяется незначительно. В этом случае предпочтительнее использовать «генератор напряжений» для установки напряжения на диоде, а ток диода измерять (рис. 6).

## Выполнение работы

1. Перед выполнением работы изучить вводную часть данного описания.
2. Собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения диода, указанной на рабочем месте.
3. Получить данные для построения прямой ветви ВАХ, задаваясь разными значениями прямого тока и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде.
4. Исследовать при заданном значении прямого тока зависимость прямого напряжения на диоде от температуры  $U = f(T)_{I=const}$ .
5. Получить данные для построения обратной ветви ВАХ, задаваясь разными значениями обратного напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока диода.
6. Исследовать при заданном значении обратного напряжения зависимость обратного тока диода от температуры  $I' = f(T)_{U'=const}$ .
7. Построить на графике выбирая соответствующие масштабы тока и напряжения на осях координат, ВАХ для прямой и обратной ветвей.
8. Построить графики зависимостей по п. 4 и 6.

## Контрольные вопросы

1. Какие типы проводимости в полупроводниках вы знаете?
2. Что такое донорный и акцепторный примесный атом?
3. Как образуются свободные электроны и дырки в ковалентных полупроводниках?
4. Какие носители называют неравновесными?
5. Что такое р-п переход?
6. Дайте определение понятиям: зона проводимости, валентная зона, за-

прещенная зона, уровень Ферми. В чем отличие энергетической структуры металлов, полупроводников и диэлектриков?

7. Что такое диод, как работает полупроводниковый диод?

8. Нарисуйте ВАХ полупроводникового диода. Почему она нелинейная? Какое напряжение называется прямым и обратным?

9. Поясните понятия: двойной заряженный слой, ширина p-n перехода, контактная разность потенциалов, высота барьера.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>

2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>

3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.

4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.

5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.

6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.

7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.

8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.

10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### Пробой $p$ - $n$ перехода

**Цель работы:** Изучить явление туннельного пробоя в  $p$ - $n$  переходе.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Существует предел повышения запирающего напряжения на  $p$ - $n$  переходе. Этот предел определяется пробоем  $p$ - $n$  перехода. Начиная с некоторого значения напряжения обратный ток увеличивается медленно, а затем все быстрее и быстрее. Если не принимать специальных мер, то переход окажется пробитым. В области больших запирающих напряжений вольтамперные характеристики (ВАХ) будут иметь вид одной из кривых, показанных на рис. 1.

Различают четыре вида пробоя:

- туннельный пробой (1);
- лавинный пробой, или пробой за счет ударной ионизации (2);
- тепловой пробой за счет кумулятивного разогрева перехода (3);
- поверхностный пробой.

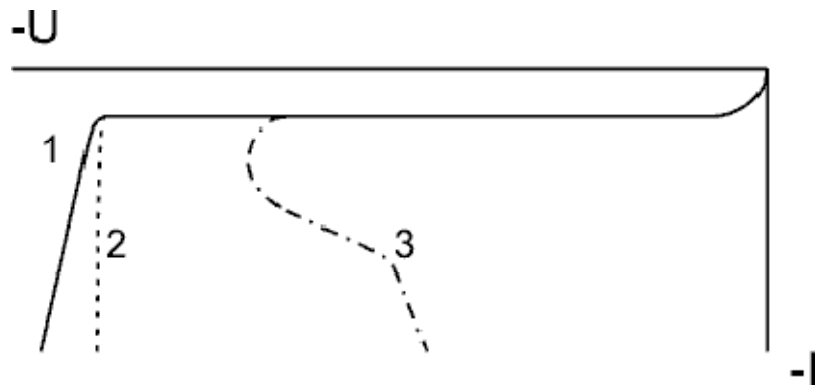


Рис. 1. ВАХ при различных видах пробоя.

Туннельный (зенеровский) пробой является результатом непосредственного воздействия сильного электрического поля на кристаллическую решетку полупроводника. При сильном обратном смещении  $p$ - $n$  перехода можно создать условия для прямых электронных переходов между валентной зоной и зоной проводимости (туннелирования). Запрещенная зона при этом трактуется как область отрицательной кинети-



ческой энергии, в которой волновые функции быстро затухают. Вероятность перехода электрона через такой потенциальный барьер (с сохранением энергии) отлична от нуля, если с другой стороны барьера имеются состояния с равной или меньшей энергией. Эта вероятность имеет существенное значение только, при большой напряженности поля и малой ширине барьера. При этом образуются парные заряды электрон-дырка, увеличивающие ток через переход. Поэтому туннельный пробой будет характерен для узких (тонких) переходов.

Лавинный пробой возникает в том случае если не основные носители, попадающие в поле области объемного заряда, приобретают энергию, достаточную для разрыва валентной связи. При столкновении с решеткой кристалла они выбивают из связи валентный электрон. В результате этого также возникает парный заряд, увеличивающий ток через переход. Для того чтобы носители заряда успели приобрести за время движения в переходе достаточную энергию, время их дрейфа должно быть относительно велико. Поэтому ударная ионизация наблюдается только в достаточно широких переходах, т. е. в переходах на относительно высокоомном материале.

Как в первом, так и во втором случае сопротивление перехода начинает падать, ток резко возрастает. Так как эти два случая являются предельными, то часто мы будем иметь дело с переходами, в которых будут действовать оба указанных механизма.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что как у сплавных, так и у диффузионных германиевых и кремниевых переходов туннельный пробой наблюдается в основном при удельных сопротивлениях менее  $0,1 \text{ ом/см}$ . Напряжения туннельного пробоя составляют при этом менее  $2\text{В}$  для германиевых и менее  $5\text{В}$  для кремниевых переходов. Пробивные напряжения свыше  $7\text{В}$  для кремниевых и свыше  $5\text{В}$  для германиевых переходов соответствуют лавинному пробую. Промежуточные значения соответствуют одновременному существованию обоих видов пробоя. ВАХ для туннельного и лавинного пробоев оказываются довольно сходными, и практически не всегда можно с уверенностью сказать, какая из причин вызвала пробой.

Температурная зависимость напряжения туннельного пробоя будет определяться температурной зависимостью ширины запрещенной зоны. С ростом температуры ширина запрещенной зоны уменьшается, вероятность туннелирования возрастает, и напряжение пробоя падает.

Температурная зависимость напряжения лавинного пробоя зависит от температурной зависимости длины свободного пробега носителей тока. При рассеянии носителей на решетке подвижность носителей уменьшается. Поэтому для того, чтобы носитель при меньшей длине свободного пробега приобрел энергию, достаточную для ионизации валентных связей, поля в переходе должны иметь большую величину. Это приводит

к тому, что напряжение пробоя будет увеличиваться с ростом температуры.

Таким образом, напряжения туннельного и лавинного пробоев имеют противоположные знаки изменения напряжения пробоя с изменением температуры  $\left(\frac{dU_n}{dt}\right)$ . Изменение знака происходит при концентрациях порядка  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В этой области ( $U_n = 5 \text{ В}$ ) изменения напряжения пробоя с температурой будут минимальными.

Тепловой пробой может иметь место в тех случаях, когда не обеспечивается необходимый отвод тепла от перехода, работающего в режиме выпрямления больших токов.

Явление поверхностного пробоя заключается в следующем. Поверхностный заряд, имеющийся практически всегда на поверхности полупроводника в месте выхода  $p$ - $n$  перехода на поверхность, может сильно исказить картину поля в переходе. Это в свою очередь повлияет на ширину перехода на поверхности и как следствие может увеличить вероятность пробоя.

## Описание установки

Исследовать пробой  $p$ - $n$  перехода можно с помощью полупроводникового стабилитрона. Полупроводниковым стабилитроном называется электронный прибор, предназначенный для получения опорного (стабильного) напряжения. Этот прибор состоит из  $p$ - $n$  перехода, системы контактов и корпуса.

Для наблюдения пробоя  $p$ - $n$  перехода необходимо его включить в обратном смещении (рис. 2). Для обеспечения защиты стабилитрона от неограниченного возрастания тока при превышении напряжения генератора выше напряжения пробоя необходимо использовать ограничивающее сопротивление  $R$ .

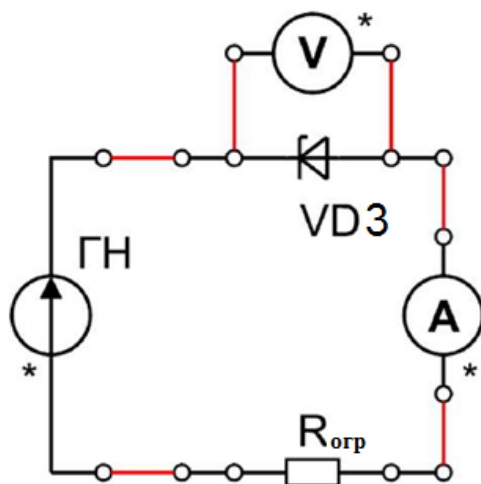


Рис.2. Схема подключения  $p$ - $n$  перехода в обратном смещении.

## Выполнение работы

1. Получить данные для построения обратной ветви ВАХ, задаваясь разными значениями обратного напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока стабилитрона. При различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 330К, 360К, 390К. Построить графики.
2. По результатам п.1 построить график зависимости напряжения стабилизации от температуры при постоянном токе стабилизации  $U_c = f(T)_{I=const}$ . Рекомендуемое значение тока стабилизации 20 мА.

## Контрольные вопросы

1. Что такое пробой *p-n* перехода?
2. Какие виды пробоя вы знаете?
3. Механизмы и условия различных видов пробоя?
4. Температурная зависимость пробоя.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

## Контакт металл-полупроводник

**Цель работы:** Изучить физические процессы, возникающие в контакте металл–полупроводник.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Рассмотрим явления в контакте металл - полупроводник при отсутствии поверхностных состояний. Возьмем контакт электронного полупроводника (n-типа) и металла в предположении, что работа выхода электрона из полупроводника  $A_n$  меньше работы выхода электрона из металла  $A_m$ , то есть  $A_n < A_m$ .

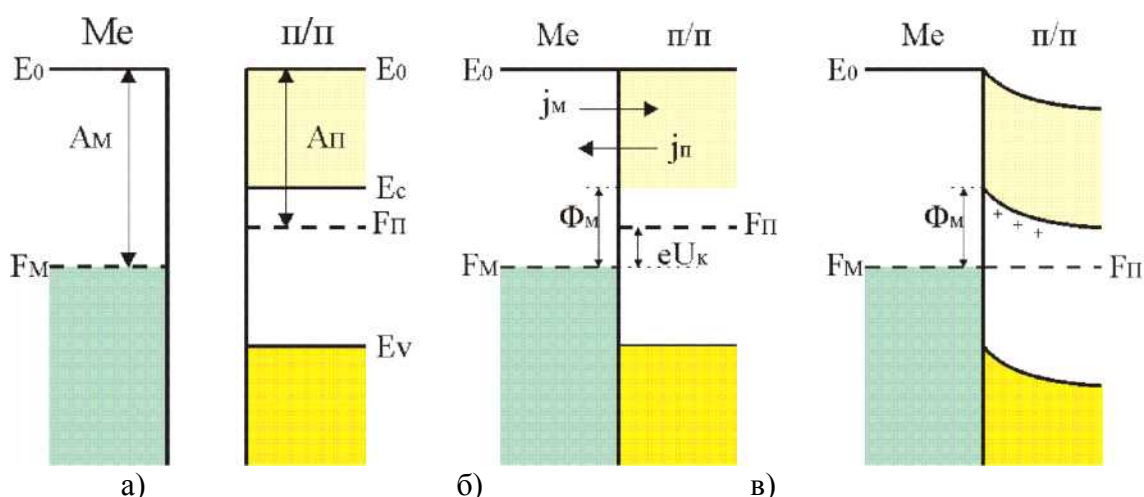


Рис. 1. Энергетическая структура а) изолированных Me и п/п, б) неравновесное состояние сразу после контакта в) равновесное состояние.

На рисунке 1а показана зонная энергетическая диаграмма металла (Me) и полупроводника (п/п) не находящихся в контакте друг с другом. Термодинамическая работа выхода - это расстояние от уровня вакуума  $E_0$  до уровня Ферми в металле  $A_m$  или в полупроводнике  $A_n$ .

Если обеспечить идеальный контакт металла и полупроводника (т.е. такой контакт, при котором отсутствует вакуумный или диэлектрический слой между Me и п/п), то электроны будут переходить преимущественно из полупроводника в металл (так как уровень Ферми в полупроводнике в момент соединения с металлом лежит выше, чем в металле,  $F_n$

$> F_m$ ) (рис.1б). При этом металл заряжается отрицательно, а в полупроводнике возникнет положительный заряд, создаваемый нескомпенсированными донорами, которые получены при уходе электронов проводимости в металл. Этот поток электронов будет иметь место до тех пор, пока уровни Ферми  $F_n$  и  $F_m$  не выровняются, после чего установится динамическое равновесие (токи  $j_n$  и  $j_u$  будут равны друг другу). Между металлом и полупроводником возникает контактная разность потенциалов

$$U_K = \frac{A_M - A_{\Pi}}{e} \quad (1)$$

Заряд на поверхности металла будет находиться в пределах длины экранирования Томаса-Ферми, которая примерно равна 0.05 нм. Т.к. концентрация доноров на несколько порядков меньше концентрации электронов в металле, то нескомпенсированные доноры займут значительный по толщине слой полупроводника  $L$ , сравнимый с шириной обедненной области р-п перехода, и энергетические зоны в полупроводнике изогнутся вверх (рис. 1 в)

Наличие потенциального барьера на границе металл - полупроводник приводит к тому, что возможно явление выпрямления переменного тока, а ВАХ для постоянного тока будет несимметричной.

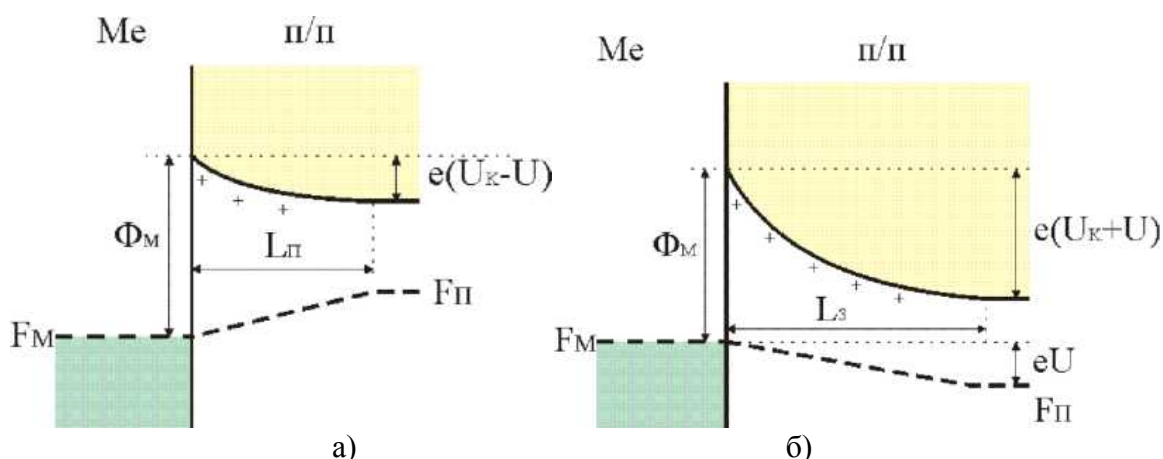


Рис. 2. Энергетическая структура контакта Ме – п/п при прямом а) и обратном б) напряжении.

За положительное напряжение  $U$  примем такое напряжение, когда металл имеет положительный потенциал относительно полупроводника. Так как в области объемного заряда  $L$  (в приконтактной области полупроводника) свободных электронов практически нет, то удельное сопротивление этой области очень велико и все внешнее напряжение будет падать здесь. При  $U > 0$  все уровни в полупроводнике сдвинутся вверх на величину  $eU$ , рис. 2а. Переход электронов из полупроводника в металл облегчится, высота барьера со стороны полупроводника уменьшится, а со стороны металла высота барьера останется той же самой  $\Phi_M$ . Результирующий поток электронов направлен от полупроводника к металлу и

увеличивается с ростом напряжения. При этом ширина обедненной области  $L_n$  уменьшится.

При  $U < 0$  все уровни в полупроводнике сдвинутся вниз на величину  $eU$ , рис.2б, и высота потенциального барьера со стороны полупроводника увеличится, а со стороны металла вновь не изменится. Вследствие этого поток электронов  $j_n$  со стороны полупроводника уменьшится, и при увеличении  $U$  этот поток станет очень мал. Поэтому через барьер будет проходить только постоянный поток электронов из металла и результирующий поток будет идти из металла в полупроводник. При этом ширина обедненной области  $L_3$  увеличится.

Процесс протекания тока через выпрямляющий контакт существенно зависит от того, испытывают ли электроны соударения при прохождении через запирающий слой или нет. Первый случай реализуется тогда, когда длина свободного пробега  $l$  электрона меньше толщины запирающего слоя  $d$ , а второй при обратном соотношении. В соответствии с этим существует две теории выпрямления: диффузионная ( $l \ll d$ ) и диодная ( $l \gg d$ ). На рис. 3 показаны ВАХ, полученные согласно диодной (кривая 1) и диффузионной (кривая 2) теории.

В обоих случаях в прямом смещении ток через диод определяется экспоненциальным членом  $I \sim \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$ . При обратном смещении экспоненциальный член мал по сравнению с единицей, и при больших значениях напряжения ток растет пропорционально  $U^{1/2}$  а в тонком стремится к насыщению.

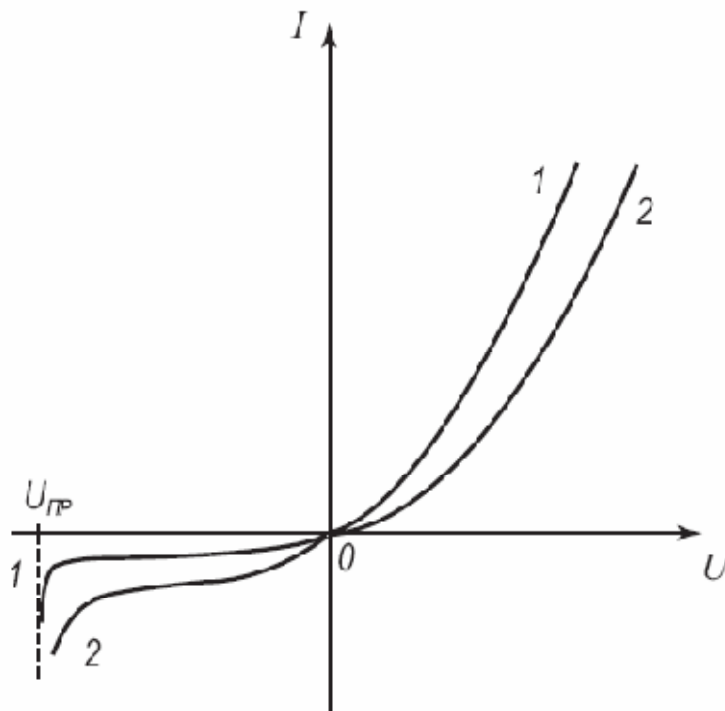


Рис. 3. ВАХ, полученные согласно диодной (кривая 1) и диффузионной (кривая 2) теории.

Для большинства реальных контактов идеальная ситуация, рассмотренная ранее, никогда не достигается. Это связано с тем, что поверхность полупроводника всегда может содержать тонкий диэлектрический слой окисла, молекулы воды, ионы различных веществ, а также другие органические и неорганические загрязнители. По этой причине ВАХ реальных полупроводниковых приборов на основе контакта металл-полупроводник (диодов Шоттки) может не совпадать с теоретической.

### Описание установки

Исследовать свойства выпрямляющего контакта металл-полупроводник можно с помощью диода Шоттки, который состоит из перехода металл-полупроводник, системы металлических выводов и корпуса.

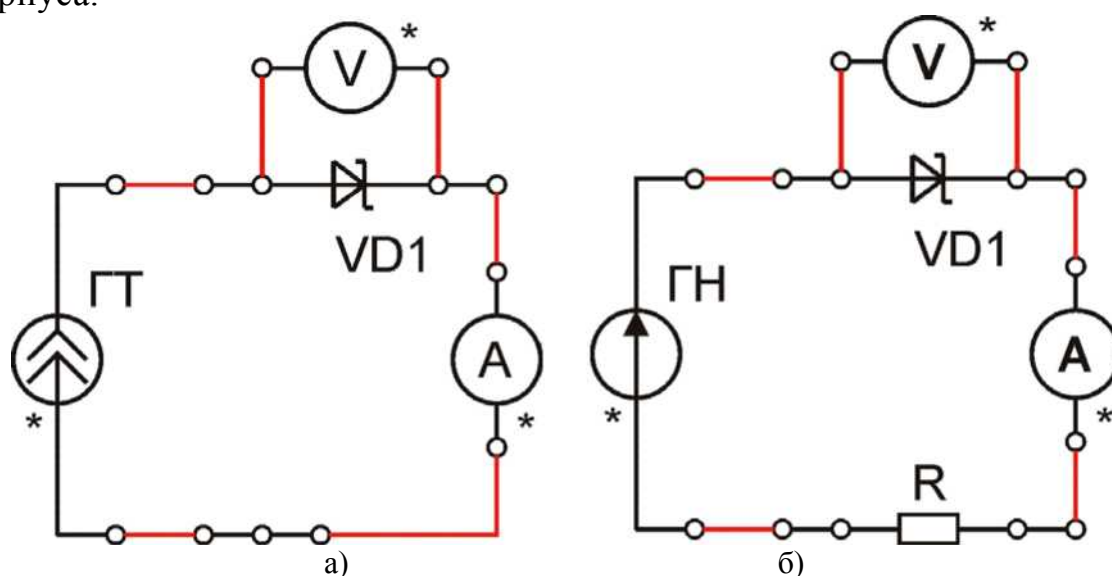


Рис. 4. Схема подключения для измерения ВАХ в прямом направлении с использованием а) «генератора тока», б) гасящего сопротивления.

При прямом смещении ВАХ имеет большую крутизну: при малом изменении прямого напряжения ток диода изменяется резко. Для экспериментального исследования ВАХ в этом случае проще и точнее устанавливать величину тока, а напряжение, полученное на диоде, измерять. Для этого в качестве источника необходимо применять либо «генератор тока» (рис. 4а), либо гасящее сопротивление R (рис. 4б).

ВАХ при обратном включении диода: даже при больших изменениях напряжения ток изменяется незначительно. В этом случае предпочтительнее использовать «генератор напряжений» для установки напряжения на диоде, а ток диода измерять (рис. 5).

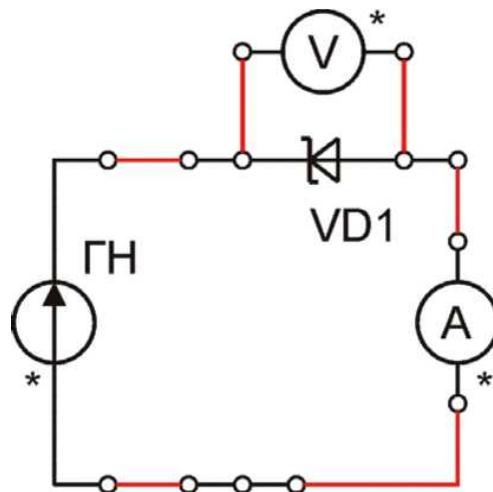


Рис. 5. Схема подключения для измерения ВАХ в обратном направлении.

## Выполнение работы

1. Перед выполнением работы изучить вводную часть данного описания.
2. Собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения диода, указанной на рабочем месте.
3. Получить данные для построения прямой ветви ВАХ, задаваясь разными значениями прямого тока и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде.
4. Исследовать при заданном значении прямого тока зависимость прямого напряжения на диоде от температуры:  $U = f(T)_{I = \text{const}}$ .
5. Получить данные для построения обратной ветви ВАХ, задаваясь разными значениями обратного напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока диода.
6. Исследовать при заданном значении обратного напряжения зависимость обратного тока диода от температуры  $I' = f(T)_{U' = \text{const}}$ .
7. Построить на графике, выбирая соответствующие масштабы тока и напряжения, на осях координат ВАХ для прямой и обратной ветвей.
8. Построить графики зависимостей по п. 4 и 6.

## Контрольные вопросы

1. Что такое электронный и дырочный полупроводники, Как добиться различной проводимости?
2. Дать определение работы выхода, контактного потенциала, уровня Ферми, длина экранирования, поверхностный заряд.
3. Как достигается динамическое равновесие в контакте металл – полупроводник?
4. Чем отличаются диодная и диффузионная теории выпрямления?
5. Что такое диод Шоттки?
6. Объясните нелинейность ВАХ диода Шоттки.



## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

### Измерение температуры и интегрального коэффициента излучения тела методом спектральных отношений

**Цель работы:** Изучение законов теплового излучения.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Источник питания ИПС1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ОК01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

#### Измерение температуры источника излучения

Испускательная способность абсолютно черного тела может быть определена для различных длин волн и температур по формуле Планка

$$r_{T,\lambda}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}, \quad (1)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;  $h$  - постоянная Планка;  $\lambda$  - длина волны;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - температура.

Следовательно, для узкого диапазона длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , в котором испускательную способность  $r^*(\lambda, T)$  можно считать постоянной, энергетическая светимость абсолютно черного тела равна

$$dR^* = r^*(\lambda, T) d\lambda.$$

Если тело не является абсолютно черным, то его испускательная способность выражается формулой

$$r(\lambda, T) = A(\lambda, T) r^*(\lambda, T)$$

где  $A(\lambda, T) < 1$  - спектральный коэффициент излучения тела.

Следовательно, энергетическую светимость тела для диапазона длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$  найдем по формуле

$$dR = A(\lambda, T) r^*(\lambda, T) d\lambda$$

Рассмотрим излучение тела с температурой  $T$  для двух различных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  при различных значениях диапазонов  $d\lambda_1$  и  $d\lambda_2$  соответственно

$$d R_1 = A_1 r_1^* d \lambda_1,$$

$$d R_2 = A_2 r_2^* d \lambda_2,$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - спектральные коэффициенты излучения тела при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно.

Излучение, дошедшее до приемника (фотодиод, фотосопротивление), составляет некоторую часть от общего излучения источника. Оно определяется размерами приемника, расстоянием от источника до приемника и наличием на пути излучения поглощающих сред, т. е. определяется такими параметрами измерительной системы, которые не изменяются в процессе опыта. Для двух различных приемников, воспринимающих поток падающего на них излучения в различных узких диапазонах длин волн, величины этих потоков будут равны:

$$J_1 = K_1 A_1 r_1^* d \lambda_1,$$

$$J_2 = K_2 A_2 r_2^* d \lambda_2,$$

где  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты использования потока излучения первым и вторым приемником соответственно, которые не изменяются в процессе опыта.

Следовательно отношение потоков излучения для двух приемников

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \left( \frac{r_1^* d \lambda_1}{r_2^* d \lambda_2} \right)$$

где величину  $Z = (K_1 A_1 / K_2 A_2)$  можно считать постоянной при условии, что зависимостью отношения спектральных коэффициентов излучения от температуры можно пренебречь для выбранных  $X_1$  и  $X_2$ .

Величины  $r_1^*$  и  $r_2^*$  определяются с помощью формулы Планка (1). Следовательно,

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \frac{c_2 \lambda_2^5 \left( e^{c_2 / \lambda_2 T} - 1 \right) d \lambda_1}{c_1 \lambda_1^5 \left( e^{c_1 / \lambda_1 T} - 1 \right) d \lambda_2},$$

где  $C_1 = 2\pi h c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт м}^2$ ,  $C_2 = h c / k = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м К}$ .

Оценим величину  $\exp (C_2 / \lambda T)$  и сравним ее с единицей. Пусть  $T = 3000 \text{ К}$ ,  $\lambda = 1 \text{ мкм}$ . Тогда,  $\exp (C_2 / \lambda T) = \exp (1,439 \cdot 10^{-2} / (10^{-6} \cdot 3000)) \approx 121$ , причем понижение температуры и уменьшение длины волны изменит эту оценку в большую сторону. Это означает, что для используемых в опытах температур и длин волн единицей в скобках в формуле Планка можно пренебречь (выполняется приближенная формула Вина).

$$\frac{J_1}{J_2} = Z \frac{\lambda_2^5 d\lambda_1}{\lambda_1^5 d\lambda_2} \exp \left[ \frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right].$$

Прологарифмируем это выражение и найдем из полученной формулы температуру  $T$ .

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{J_1}{J_2} - \ln Z - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}}.$$

Учтем, что в процессе опытов сохраняются значения  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $d\lambda_1$ ,  $d\lambda_2$ . Поэтому объединим члены, содержащие постоянные величины, в две новые константы  $L$  и  $Z_0$ :

$$L = C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right),$$

$$Z_0 = \ln Z + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}.$$

Тогда формула для определения температуры примет вид

$$T = \frac{L}{\ln \frac{J_1}{J_2} - Z_0} \quad (2)$$

Из формулы (2) видно что, зная из тарировочных опытов величину  $Z_0$  и рассчитав значения  $L$ , можно, измерив отношение  $J_1/J_2$ , определить соответствующую температуру излучающего тела. Важно отметить, что прибор, используемый в работе, измеряет не абсолютное значение потока, а его отношение к  $J_0$ , которая остается постоянной в процессе измерений.

### Измерение интегрального коэффициента излучения тела

Интегральный коэффициент излучения (коэффициент черноты) тела  $A_T$  определяется отношением

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*},$$

где  $R_T$  - энергетическая светимость тела при температуре  $T$ ,  $R_T^*$  - энергетическая светимость абсолютно черного тела при этой же температуре.

Для вольфрама, который используется в этой лабораторной работе в качестве источника излучения (нить накала электролампы), интегральный коэффициент излучения для температуры  $T = 2000\text{K}$  надежно измерен. Он оказался равным  $A_{2000} = 0,249$ .

Это позволяет применить относительный метод исследования зависимости интегрального коэффициента излучения от температуры излучающего тела.

Выразим интегральный коэффициент излучения при некоторой температуре  $T$  через измеряемые величины и  $A_{2000}$ . Согласно определению

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*}, \quad A_{2000} = \frac{R_{2000}}{R_{2000}^*}$$

Учтем, что по закону Стефана-Больцмана энергетические светимости абсолютно черного тела в этих выражениях равны

$$R_T^* = \sigma T^4, \quad R_{2000}^* = \sigma 2000^4.$$

Если считать, что потери энергии за счет теплопроводности и конвекции малы, т.е. вся подводимая к вольфрамовой нити лампы энергия электрического тока превращается в энергию излучения, то энергетическую светимость источника можно выразить через мощность  $P_{ист}$ , которая рассеивается на нем:

$$R_T = \frac{P_{ист}}{S},$$

где  $S$  - площадь излучающей поверхности.

Найдем отношение коэффициентов излучения

$$\frac{A_T}{A_{2000}} = \frac{R_T R_{2000}^*}{R_T^* R_{2000}} = \frac{\sigma S (2000)^4 P_{ист}}{\sigma S T^4 P_{ист2000}} = \frac{(2000)^4 P_{ист}}{T^4 P_{ист2000}} = K \frac{P_{ист}}{T^4}.$$

Величину  $K$  в последней формуле можно определить из выше описанных опытов по определению температуры, если в процессе измерений снимать дополнительно значения мощности, рассеиваемой источником. Это несложно сделать, так как источник излучения нагревается электрическим током, мощность которого при высоких температурах равна

$$P_{ист} = UI, \quad (3)$$

где  $U$  - напряжение на вольфрамовой спирали источника теплового излучения,  $I$  - сила тока в спирали.

Следовательно, для интегрального коэффициента излучения получаем формулу

$$A_T = A_{2000} K \frac{P_{ист}}{T^4}, \quad (4)$$

где  $K = \frac{(2000)^4}{P_{ист2000}}$ ,  $A = 0,249$ .

## Выполнение работы

1. Заготовьте таблицу измерений следующих величин:

-силы тока  $I$ , протекающего через источник теплового излучения;

-соответствующего напряжения  $U$  на вольфрамовой спирали,

-величины относительной интенсивности первого и второго фотоприемника  $J_1/J_0$  и  $J_2/J_0$ , которые будут сниматься с регистрирующего прибора.

Кроме того, в таблице нужно заготовить столбцы для

- вычисленных значений мощности, выделяемой источником  $P_{\text{ист}}$ ,
  - отношения сигналов с фотоприемников  $J_1/J_2$ ,
  - температуры нагретого тела  $T$ ,
  - интегрального коэффициента излучения  $A_T$ .
2. Установите малое значение напряжения накала. Установите регулятор  $J_0$  прибора в определенное положение и не вращайте ее в процессе дальнейших измерений. Снимите показания  $J_1/J_0$  и  $J_2/J_0$  с цифрового индикатора измерителя относительной интенсивности теплового излучения. Снимите показания амперметра и вольтметра. Внесите показания в таблицу измерений.
  3. Постепенно увеличивая напряжение генератора, снимите такие же показания (п. 2) при 8-ми - 10-ти различных температурах источника излучения.
  4. Пользуясь рабочей формулой (2), вычислите температуры источника излучения при различных значениях мощности, выделяемой на источнике. Полученная при тарировочных опытах величина  $Z_o = 1,784$ .
  5. Вычислите по формуле (3) мощность, выделяющуюся на спирали источника излучения для каждого значения температуры. Обратите особое внимание на мощность при  $T = 2000$  К.
  6. Пользуясь рабочей формулой (4), вычислите значения интегрального коэффициента излучения  $A_T$  источника в исследованном диапазоне температур и постройте график  $A_T = f(T)$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое равновесное излучение, излучательная способность, абсолютно черного тела, испускательный коэффициент излучения.
2. Закон Кирхгоффа.
3. Закон Стефана-Больцмана.
4. Закон Вина
5. Формула Планка. Какие предположения были сделаны при выводе формулы ?

### Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>

2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

### Исследование электропроводности металлов

**Цель работы:** Исследовать температурную зависимость электропроводности металлов.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Металлы обычно определяются как вещества пластичные, с характерным блеском, хорошо проводящие электрический ток и теплоту.

Для электропроводности металлов типичны:

а) низкое значение удельного сопротивления при комнатной температуре (от сотых долей до единиц микроОм/метр);

б) значительный рост сопротивления при повышении температуры, близкий к прямой пропорциональной сопротивлению уменьшается до очень малого значения, составляющего для наиболее чистых металлов  $10^{-5}$  или даже меньшую долю сопротивления при комнатной температуре.

Электропроводность  $\sigma$  металлов зависит от концентрации свободных электронов  $n$  и их подвижности  $\mu$  по формуле

$$\sigma = en\mu = \frac{e^2 n}{m} \bar{\tau} \approx \frac{1}{T} \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона;  $m$  - масса носителей заряда;  $T$  - среднее время свободного пробега носителей заряда.

Концентрация свободных электронов в металле составляет примерно  $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , т.е. того же порядка, что и число атомов в  $1 \text{ м}^3$ . В проводимости принимают участие валентные электроны. Они обобществляются кристаллической решеткой металла при очень низких абсолютных температурах. Другие электроны очень прочно связаны с атомами и не становятся свободными даже при очень высоких температурах. Из этого следует, что концентрация носителей заряда в металлах не зависит от температуры. Среднее время свободного пробега носителей заряда при повышении температуры металлов уменьшается по закону  $\bar{\tau} \approx \frac{1}{T}$ , что объясняется рассеянием их на фонах. Сделанное утверждение не относится к области очень низких температур, при которых основным становится рассеяние на примесях и других дефектах кристаллической



решетки. Поскольку электропроводность обратно пропорциональна удельному электрическому сопротивлению вещества  $\sigma = 1/\rho$ , то сопротивление металла  $R_1$  линейно растет с повышением его абсолютной температуры  $T_1$  по закону

$$R_1 = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (2)$$

где  $R_0$ - сопротивление при некоторой условной температуре  $T_0$  (обычно при 273К);  $\Delta T = (T_1 - T_0)$ ,  $\alpha$ - температурный коэффициент сопротивления, показывающий относительное изменение величины сопротивления при изменении температуры на один градус:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad (3)$$

где  $\Delta R = (R_1 - R_0)$ .

Коэффициент  $\alpha$  для металлов положителен, почти не меняется с температурой и мал по абсолютной величине по сравнению с  $\alpha$  для полупроводников. В таблице 1 приведены значения температурных коэффициентов сопротивления для некоторых металлов.

Таблица 1

Металл	Медь	Вольфрам	Платина	Хром	Никель	Палладий	Серебро
$\alpha, \text{K}^{-1} \times 10^{-3}$	4,3	5,0	3,9	2,4	6,7	3,6	4,1

Заметим, что зависимость (2) нельзя экстраполировать до абсолютного нуля температур, при стремлении к которому сопротивление обычных металлов (не сверхпроводников) стремится к некоторой конечной величине, обусловленной наличием примесей и дефектов решетки.

## Описание установки

В качестве металлического образца в стенде СЗ-ТТ01 установлен металлический терморезистор (платиновый тонкопленочный резистор). Для нахождения сопротивления терморезистора можно воспользоваться методом амперметра-вольтметра по закону Ома.

$$R = \frac{U}{I} \quad (4)$$

Для проведения измерений электрическая схема представлена на рис. 1.

Так как измеряемое сопротивление  $R$  намного меньше внутреннего сопротивления вольтметра, то вольтметр подключен параллельно измеряемому сопротивлению.

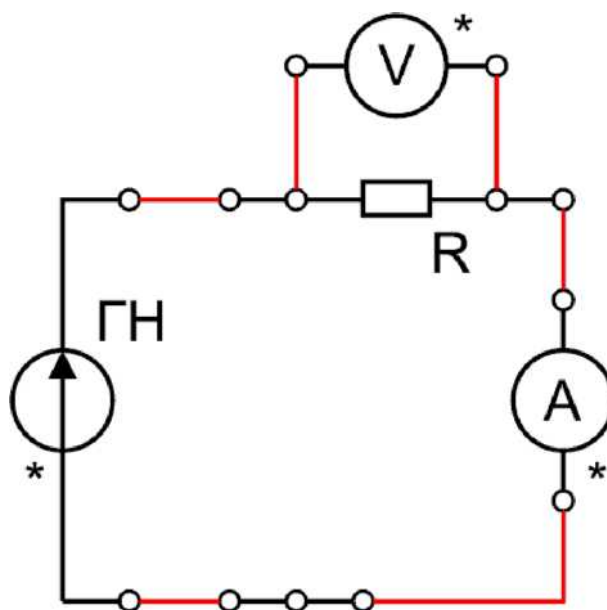


Рис. 1. Электрическая схема для проведения измерений.

## Выполнение работы

1. Снять ВАХ ( $U=f(I)$ ) металлического образца при двух различных температурах образца. Рекомендуемые значения температуры  $T=300\text{K}$  и  $T=360\text{K}$ . Рекомендуемый диапазон изменения тока  $0 - 5$  мА. Построить графики.
2. Снять зависимость сопротивления металлического образца от температуры  $R=f(T)$  при постоянном токе  $I=const$ . Рекомендуемое значение  $1$  мА. Т.к схема питается от генератора напряжения, то при нагреве образца ток может изменяться. По этому необходимо перед измерением установить требуемое значение тока.
3. Рассчитайте по формуле (3) значение температурного коэффициента сопротивления  $\alpha$ . По таблице 1 определите материал, из которого сделан терморезистор.

Примечание: Для быстрого охлаждения образца воспользуйтесь вентилятором.

## Контрольные вопросы

1. Формула для определения электропроводности металлов.
2. Температурная зависимость удельного сопротивления металла.
3. Влияние примесей и дефектов на электропроводность металлов

4. Закон Ома в дифференциальной форме.
5. Закон Видемана-Франца для металлов.
6. Основные положения теории свободных электронов Друде и её недостатки.
7. Зонная теория твердого тела о проводимости металлов. Отказ от приближения свободных электронов и введение понятия «блоховского» электрона.
8. Рассеяние электронов на фононах при высоких температурах.
9. Рассеяние электронов на примесях и дефектах при низких температурах.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 2000.-495 с.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008.-792 с.
5. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. –М.: Мир, 2006.- 608 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

### Исследование электропроводности полупроводников

**Цель работы:** Исследовать температурную зависимость электропроводности полупроводников.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

В отличие от металлов, в собственных полупроводниках при абсолютном нуле в зоне проводимости носители заряда отсутствуют. С повышением температуры число носителей значительно возрастает. Подвижность носителей в области низких температур из-за рассеяния на ионах примеси пропорциональна  $T^{3/2}$ . В области высоких температур основное значение имеет рассеяние на тепловых колебаниях решетки (фононах) и  $\mu \propto T^{-3/2}$ , т.е. подвижность с ростом температуры уменьшается. Но так как концентрация свободных носителей заряда с ростом температуры увеличивается значительно быстрее, чем уменьшается подвижность, то проводимость растет по закону:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E / 2k_b T) = \sigma_0 \exp(-B / T) \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  - от температуры не зависит;  $\Delta E$  - энергия активация примеси (или ширина запрещенной зоны);  $k_b$  - постоянная Больцмана,  $B = (\Delta E / 2k_b)$  - коэффициент температурной чувствительности, который определяется структурой полупроводника и является характеристикой исследуемого материала.

Сопротивление полупроводников с ростом температуры убывает по экспоненциальному закону:

$$R_T = R_0 \exp(\Delta E / 2k_b T) = R_0 \exp(B / T) \quad (2)$$

где  $R_0$  - условное сопротивление полупроводника при  $T \rightarrow \infty$ .

Экспериментальные кривые  $\ln R = f(1/T)$  являются почти прямыми линиями (см. рис.1).

Значение коэффициента температурной чувствительности  $B$  можно определить экспериментально, измерив сопротивления собственного полупроводника на линейном участке (рис. 1) при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$ :

$$R_1 = R_0 \exp(B / T_1) \quad (3)$$

$$R_2 = R_0 \exp(B / T_2) \quad (4)$$

Деля почленно выражения (3) и (4) и затем логарифмируя, получим:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (5)$$



Рис.1. Экспериментальные кривые  $\ln R = f(1/T)$

Чтобы охватить весь диапазон  $R(T)$ , на практике вместо формулы (2) часто используют зависимость

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{B}{T} \quad (6)$$

Статическая вольт-амперная характеристика полупроводникового образца имеет ярко выраженный нелинейный характер. Типичный ее вид показан на рис.2. На ней можно выделить три основных участка: ОА, АВ, ВС. На участке ОА характеристика линейна, так как мощность, выделяющаяся в образце, мала и не изменяет его температуру. На участке АВ линейность нарушается, так как с повышением тока мощность рассеяния увеличивается, температура образца повышается, следовательно, сопротивление его уменьшается. При некотором значении тока кривая достигает максимума, и в небольшом интервале напряжение на образце остается постоянным, так как относительное увеличение тока становится равным вызванному им относительному понижению сопротивления. На участке ВС при дальнейшем увеличении тока уменьшение сопротивления оказывается столь сильным, что рост тока ведет к уменьшению напряжения на образце, и появляется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Резкая зависимость сопротивления полупроводника от температуры используется для устройства большого класса полупроводниковых

терморезисторов или термисторов. Малые габариты, высокая механическая прочность и надежность, большой срок службы и высокая чувствительность терморезисторов определили широкое применение их в приборах для измерения и регулирования температуры, температурной компенсации элементов электрических цепей, измерения мощности электромагнитного излучения и т. д.

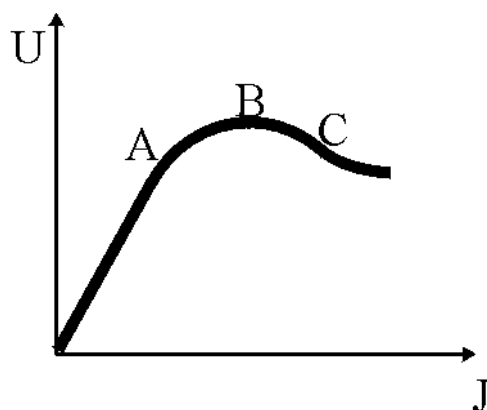


Рис.2. Статическая вольт-амперная характеристика полупроводникового образца.

### Описание установки

В качестве полупроводникового образца в стенде СЗ-ТТ01 установлен терморезистор. Для нахождения сопротивления терморезистора можно воспользоваться методом амперметра- вольтметра по закону Ома.

$$R = \frac{U}{I} \quad (7)$$

Для проведения измерений электрическая схема представлена на рис. 3.

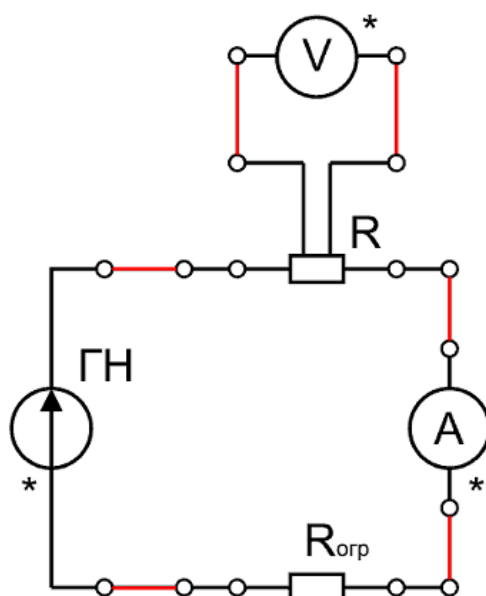


Рис. 3. Электрическая схема для проведения измерений.

Так как измеряемое сопротивление  $R$  намного меньше внутреннего сопротивления вольтметра, то вольтметр подключен параллельно измеряемому сопротивлению.

Поскольку при нагревании сопротивление полупроводникового образца может уменьшиться в несколько раз, то необходимо в схеме использовать ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$ .

## Выполнение работы

1. Снять ВАХ ( $U=f(I)$ ) полупроводникового образца при двух различных температурах образца. Рекомендуемые значения температуры  $T=300\text{K}$  и  $T=360\text{K}$ . Рекомендуемый диапазон изменения тока 0 - 5 мА. Построить графики.

2. Снять зависимость сопротивления полупроводникового образца от температуры  $R=f(T)$  при постоянном токе  $I=\text{const}$ . Рекомендуемое значение тока 1 мА. Так как схема питается от генератора напряжения, то при нагреве образца ток может изменяться. По этому необходимо перед каждым измерением установить требуемое значение тока. Для уменьшения влияния изменяющейся нагрузки на величину выходного тока можно в генераторе ГН1 включить внутреннее сопротивление (680 Ом).

3. Построить зависимость  $\ln R=f(1/T)$  и по формуле (5) рассчитать значение коэффициента температурной чувствительности  $B$ .

Примечание: Для быстрого охлаждения образца воспользуйтесь вентилятором.

## Контрольные вопросы

1. Собственная проводимость полупроводников. Формула для определения равновесной концентрации электронов в полупроводнике. Эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

2. Формула для определения равновесной концентрации дырок в полупроводнике. Эффективная плотность состояний в валентной зоне.

3. Зависимость уровня Ферми от температуры в собственном полупроводнике.

4. Зависимость концентрации носителей в собственном полупроводнике от температуры.

5. Вид температурной зависимости подвижности носителей в собственном полупроводнике, обусловленной рассеянием на фононах. Случай невырожденного и вырожденного газа электронов.

6. Проводимость примесных полупроводников.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 2000.-495 с.
4. Зегря Г.Г, Перель В.И. Основы физики полупроводников. [Электронный ресурс].- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.-334 с.- URL: [http://www.biblioclub.ru/68394\\_Osnovy\\_fiziki\\_poluprovodnikov.html8](http://www.biblioclub.ru/68394_Osnovy_fiziki_poluprovodnikov.html8).
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М.: Лань, 2008. - 616 с.
6. Китель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Наука, ГРФМЛ, 2008.- 792 с.
7. Блейкмор Дж. Физика твердого тела. –М.: Мир, 2006.- 608 с.
8. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975. – 584 с.
9. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.
10. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников.. – М.: Высшая школа, 1984. – 352 с.
11. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.-320 с.
12. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

### Определение ширины запрещенной зоны полупроводников

**Цель работы:** Исследовать зависимость электропроводности полупроводника от температуры и по ней определить ширину запрещенной зоны.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Зависимость концентрации носителей от температуры в первую очередь проявляет себя при исследовании электропроводности полупроводников  $\sigma$ . Электропроводность полупроводника определяется в общем случае двумя типами носителей заряда:  $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_p)$ , где  $e$  - заряд электрона,  $\mu_e$  и  $\mu_p$  - подвижности электронов и дырок, соответственно. (Заметим, что подвижность определяет дрейфовую скорость  $\vec{V}$  носителей заряда:  $\vec{V} = \mu_e \vec{E}$ ,  $\vec{V}_p = \mu_p \vec{E}$ .) Таким образом, от температуры могут зависеть только концентрация и подвижность. Очевидно, что подвижность тем выше, чем реже сталкиваются частицы, чем менее интенсивное рассеяние.

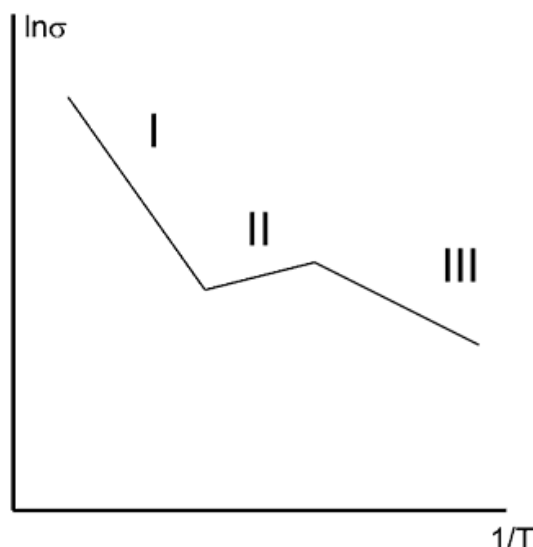


Рис.1. Типичная зависимость логарифма электропроводности от обратной температуры для полупроводников.

В полупроводниках возможны следующие механизмы рассеяния: рассеяние на ионах и нейтральных атомах примеси; на дефектах кристаллической структуры и в основном на колебаниях решетки (фононах). Как показывают расчеты, зависимость подвижности от температуры можно представить себе как степенную функцию:  $\mu \propto T^\alpha$ , где  $\alpha$  определяется видом рассеяния. Например, при рассеянии на акустических колебаниях решетки  $\alpha = -1.5$ . Естественно, что более сильная зависимость концентрации от температуры по сравнению с температурной зависимостью подвижности и определяет, прежде всего, зависимость проводимости от температуры.

На рис.1 показана типичная зависимость логарифма электропроводности от обратной температуры. Линейные области соответствуют собственной проводимости I и примесной III. Область II - переходная область.

При относительно высоких температурах проводимость полупроводника в области собственной проводимости равна

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны;  $k_B$  - постоянная Больцмана;  $T$  - температура.

Обычно экспериментально измеряются ток через образец, падение напряжения и температура. Поэтому удобнее пользоваться величиной сопротивления образца  $R$ .

Учитывая, что  $R = \rho l / S$ , а  $\rho = 1/\sigma$ , где  $\rho$  - удельное сопротивление,  $l$  - длина образца,  $S$  - площадь поперечного сечения, то из формулы (1) получаем

$$R = R_0 \exp(\Delta E / 2k_B T). \quad (2)$$

Логарифмируя выражение (2) и вычисля производную по  $1/T$ , получаем для ширины запрещенной зоны формулу

$$\Delta E = 2k_B \frac{d \ln R}{d(1/T)} \quad (3)$$

Формула (3) позволяет рассчитать ширину запрещенной зоны полупроводника графически, вычисляя численное значение производной:

$$\frac{d \ln R}{d(1/T)} = \frac{\Delta \ln R}{\Delta(1/T)}. \quad (4)$$

В таблице 1 приведены значения ширины запрещенной  $\Delta E$  для некоторых полупроводников.

Таблица 1

Материал	Ge	Si	CaAs	CdS	CdSe	PbS	InSb
$\Delta E$ , эВ	0.72	1.12	1.42	2.42	1.70	0.41	0.17

## Описание установки

Для определения ширины запрещенной зоны в стенде СЗ-ТТ01 установлен полупроводниковый образец. Для нахождения сопротивления терморезистора можно воспользоваться методом амперметра-вольтметра по закону Ома.

$$R=U/I. \quad (5)$$

Для проведения измерений электрическая схема представлена на рис. 2. Поскольку измеряемое сопротивление  $R$  намного меньше внутреннего сопротивления вольтметра, то вольтметр подключен параллельно измеряемому сопротивлению.

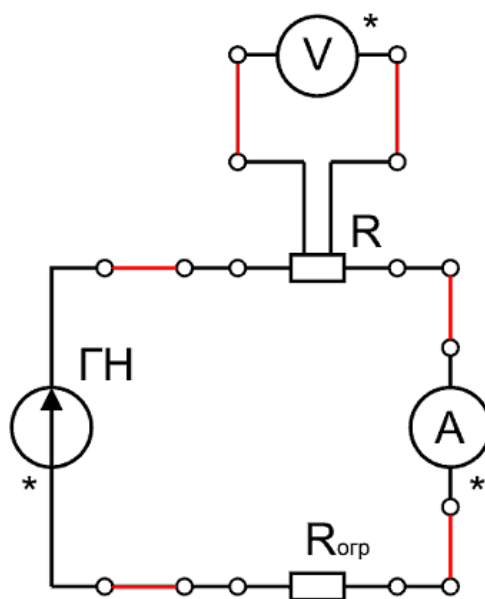


Рис.2. Электрическая схема для проведения измерений.

Так как при нагревании сопротивление полупроводникового образца может уменьшиться в несколько раз, то необходимо в схеме использовать ограничивающее сопротивление  $R_{огр}$ .

## Выполнение работы

1. Снять значения напряжения, при постоянном токе  $I=const$  при различных температурах в диапазоне от 290 до 390 К. Рекомендуемое значение тока 1 мА.
2. Постройте график зависимости  $\ln R$  от  $1/T$ .
3. На линейном участке полученного графика определите величину производной и пользуясь формулой (4), рассчитайте ширину запрещенной зоны полупроводника. По таблице 1 определите материал, из которого сделан образец.

## Контрольные вопросы

1. Выведите формулу (3) для определения запрещенной зоны полупроводника.
2. Классификация твердых тел по величине электропроводности.
3. Уравнение Шредингера для твердого тела.
4. Одноэлектронное приближение.
5. Функции Блоха.
6. Энергетический спектр электронов в кристалле. Модель Кронига-Пенни.
7. Заполнение зон электронами. Металлы, диэлектрики. Полупроводники.
8. Эффективная масса электрона.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

### Эффект Холла в примесных полупроводниках

**Цель работы:** Изучение эффекта Холла в примесных полупроводниках. Ознакомление с методом измерения концентрации и подвижности основных носителей тока в примесных полупроводниках с помощью эффекта Холла

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ГН4.
3. Стенд с объектами исследования СЗ–ЭХ01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Пусть по образцу, имеющему форму прямоугольного параллелепипеда, протекает электрический ток силой  $I$ , поддерживаемый источником (рис.1). Найдём на нижней и верхней гранях точки 3 и 4, лежащие на одной эквипотенциальной поверхности (т. е. точки, разность потенциалов между которыми при протекании тока равна нулю) и припаяем к ним измерительные зонды. Поместим образец в поперечное магнитное поле, как показано на рис.1. Теперь на движущиеся носители тока будет действовать сила Лоренца, в результате между точками 3 и 4 возникнет разность потенциалов. Это напряжение называется напряжением Холла, а само явление – поперечным эффектом Холла.

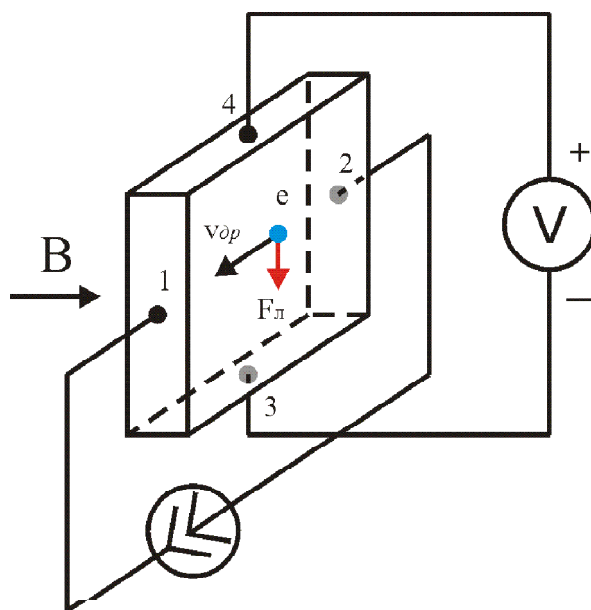


Рис. 1. Схема изучения эффекта Холла.

Опыт показывает, что

$$U_x = R_x \frac{IB}{b}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока протекающего через образец;  $B$  - индукция магнитного поля;  $b$  – толщина образца (размер по магнитному полю);  $R_x$  - постоянная Холла, зависящая от рода вещества.

Рассмотрим механизм появления поперечной разности потенциалов в примесном полупроводнике. Если носителями тока в образце являются отрицательно заряженные электроны (полупроводник  $n$  - типа), их дрейфовая скорость  $\vec{v}_{dp}$  направлена против направления тока. Сила Лоренца  $F_L$ , действующая на каждый электрон, перпендикулярна как вектору дрейфовой скорости, так и вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  и равна

$$\vec{F}_L = q_e [\vec{v}_{dp} \times \vec{B}],$$

где  $q_e$  – заряд электрона.

Сила Лоренца для ситуации, которая изображена на рис.1, будет смещать электроны к нижней грани образца (точка 3), в результате чего грань получит избыточный отрицательный заряд. На верхней грани за счет оттока от нее электронов возникнет нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси. Перераспределение заряда приведет к появлению в пространстве между гранями электрического поля, вектор напряженности  $\vec{E}$  которого направлен от положительно заряженной грани к отрицательно заряженной. Электроны будут испытывать со стороны этого электрического поля действие силы, направленной против  $\vec{E}$ :

$$\vec{F}_{эл} = q_e \vec{E}.$$

Из сказанного следует, что на электрон внутри образца действуют одновременно две поперечные противоположно направленные силы: сила Лоренца и сила со стороны электрического поля. Накопление избыточного заряда на гранях образца прекратится, когда векторная сумма этих сил станет равной нулю. Достигнутое при этом состояние называется стационарным, т.е. не меняющимся со временем. Для этого состояния выполняется равенство

$$\vec{F}_L = q_e E_x,$$

где  $E_x$  – напряженность холловского поля, которая связана с холловской разностью потенциалов  $U_x$  между точками 3 и 4 образца формулой

$$E_x = \frac{U_x}{d}.$$

Если для изготовления исследуемого образца используется примесный полупроводник  $p$ -типа, в котором основными носителями тока являются положительно заряженные дырки, то направление их движения будет совпадать с направлением тока. Сила Лоренца, действующая на дырки со стороны магнитного поля  $\vec{B}$  (рис.1) будет направлена по-прежнему к нижней грани. Следовательно, нижняя грань такого датчика получит избыточный положительный заряд, а верхняя – отрицательный. Знак заряда граней легко установить по знаку разности потенциалов между гранями, то есть по знаку величины  $U_x$ .

Любой примесный полупроводник при достаточно высокой для него температуре становится собственным. У собственного полупроводника концентрации свободных электронов и дырок одинаковы. Чтобы быть уверенными, что исследуемый образец содержит один тип носителей тока, необходимо, определить рабочий диапазон температур. Для этого достаточно экспериментально получить зависимость  $\ln \sigma = f(T^{-1})$ , где  $\sigma$  – электропроводность полупроводникового образца при абсолютной температуре  $T$ . Из теории известно, что эта зависимость имеет вид, представленный на рис. 2.

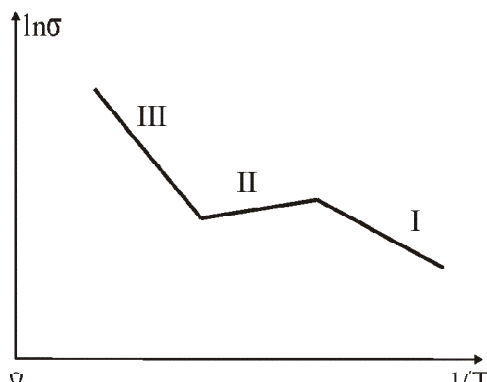


Рис. 2. Схематическая зависимость проводимости полупроводника от температуры.

Здесь первый участок зависимости, который наблюдается при низких температурах, соответствует примесной проводимости, второй при средних температурах – насыщению примесной проводимости, а третий при высоких температурах – собственной проводимости. Для измерений подходит диапазон температур, соответствующий области примесной проводимости и области насыщения примесной проводимости. В этом диапазоне температур концентрация носителей тока одного знака существенно превышает концентрацию носителей другого знака.

Если, как предполагалось выше, датчик изготовлен из донорного полупроводника, то его электропроводность определяется формулой

$$\sigma = q_e n \mu, \quad (2)$$

где  $n$  - концентрация свободных электронов,  $\mu$  - подвижность носителей тока, которая равна:

$$\mu = \frac{v_{др}}{E},$$

где  $v_{др}$  - дрейфовая скорость носителей тока при напряженности электрического поля  $\vec{E}$ .

Постоянная Холла в области температур, для которой концентрация свободных электронов много больше концентрации дырок, определяется формулой

$$R_X = \frac{a}{q_e n}, \quad (3)$$

где поправочный множитель  $a$  учитывает механизм рассеяния носителей тока в полупроводнике. Для низких температур, когда основным является рассеяние на ионах примеси, он равен  $a = 1,93$ .

Все эти характеристики зависят от температуры  $T$  и от типа рассеяния. При низких температурах

$$\mu \propto T^{\frac{3}{2}},$$
$$n = n_0 \exp(-\Delta E_a / k_B T),$$

где  $\Delta E_a$  - энергия активации примеси,  $k_B$  - постоянная Больцмана.

## Описание установки

Электропроводность образца  $\sigma$  есть величина, обратная его удельному сопротивлению  $\rho$ :

$$\sigma = 1/\rho.$$

Удельное сопротивление связано с сопротивлением образца, измеряемым на участке между точками 1 и 2:

$$R_{12} = \rho \frac{L_{12}}{bd},$$

где  $L_{12}$  - расстояние между точками 1 и 2 образца;  $bd$  - площадь поперечного сечения образца.

Сопротивление, сила тока и продольное напряжение между точками 1 и 2 связаны между собой законом Ома:

$$IR_{12} = U_{12}.$$

Из полученной системы уравнений следует рабочая формула для экспериментального определения электропроводности:



$$\sigma = \frac{I L_{12}}{U_{12} b d}. \quad (4)$$

На рис. 3 представлена схема измерения электропроводности образца.

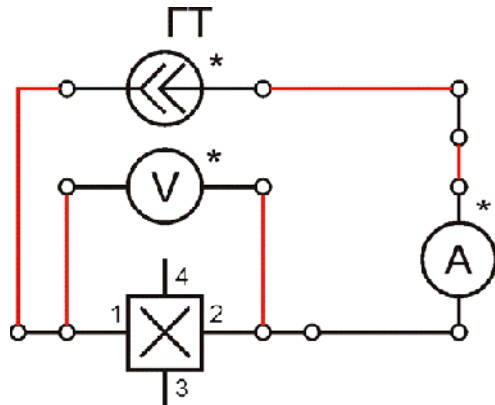


Рис. 3. Схема измерения электропроводности образца.

Холловское напряжение  $U_x$  измеряется между точками 3 и 4 образца (рис. 3), которые должны быть эквипотенциальны при нулевом значении индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Однако, практически расположить точки 3 и 4 на одной эквипотенциальной поверхности невозможно. Поэтому между этими точками, кроме холловской разности потенциалов  $U_x$ , имеется дополнительная продольная разность потенциалов  $\Delta U$ , по величине не меньшая холловской. Эту погрешность необходимо исключить.

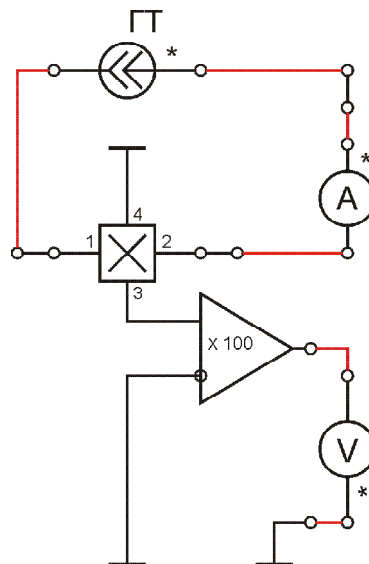


Рис. 4. Схема измерения напряжения Холла.

Воспользуемся для этого тем, что при изменении направления вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  на противоположное и неизменном направлении тока  $I$ , знак холловского напряжения  $U_x$  изменяется, а знак

продольной разности потенциалов  $\Delta U$  не изменяется. Следовательно, при одном направлении  $\vec{V}$  напряжение между точками 3 и 4, будет составлять  $U'_{34} = U_x + \Delta U$ , а при обратном направлении  $\vec{V}$  это же напряжение будет равно  $U''_{34} = -U_x + \Delta U$ . Вычтя из первого выражения второе и выразив  $U_x$ , получим формулу, в которой паразитное напряжение  $\Delta U$  исключено:

$$U_x = \left| \frac{U'_{34} - U''_{34}}{2} \right|. \quad (5)$$

Для усиления сигнала с датчика Холла используется неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 100. Вольтметр необходимо подключить к выходу этого усилителя.

## Выполнение работы

1. Соберите электрическую схему по рис.3. В качестве источника подключите генератор тока. Рекомендуемое значение силы тока - 1 мА. Изменяя температуру  $T$  от комнатной до максимальной (380 К), измерьте продольное напряжение  $U_{12}$ .
2. Вычислите электропроводность  $\sigma$  по формуле (4) и величину  $\ln \sigma$  для каждого значения  $T$ .
3. Постройте график зависимости  $\ln \sigma$  от величины  $T^{-1}$ . Определите по графику диапазон температур, соответствующий одному типу проводимости.
4. Получите зависимость холловского напряжения от величины магнитного поля  $B$  при постоянной силе тока и постоянной температуре из выбранного диапазона. Измерения необходимо проводить, пользуясь методикой, приводящей к формуле (5).
5. Получите зависимость холловского напряжения  $U_x$  от величины тока  $I$  при постоянной величине магнитного поля  $B$  и постоянной температуре  $T$  из выбранного диапазона. Измерения необходимо проводить, пользуясь методикой, приводящей к формуле (5).
6. Получите зависимость холловского напряжения от температуры при постоянной величине магнитного поля  $B$  и постоянном токе  $I$ . Измерения необходимо производить в найденном диапазоне температур пользуясь методикой, приводящей к формуле (5).
7. Оцените значения  $R_x$  для разных температур по формуле (1).
8. Оцените значения  $n$  для разных температур по формуле (3).
9. Оцените значения  $\mu$  по для разных температур формуле (2).
10. По знаку  $U_x$  определите тип полупроводника ( $n$  или  $p$ ).

## Контрольные вопросы

1. Какова природа эффекта Холла? Будет ли эффект Холла наблюдаться в компенсированном полупроводнике (при равенстве концентраций электронов и дырок)?
2. Почему у полупроводников константа Холла на несколько порядков больше, чем у металлов?
3. Каковы единицы измерения подвижности и константы Холла в системе СИ?
4. Какую характеристику образца, кроме постоянной Холла, надо знать, чтобы определить подвижность носителей тока в нём?
5. Как зависит проводимость собственного и примесного полупроводников от температуры?
6. От чего зависит подвижность носителей тока в собственном и примесном полупроводниках?
7. Как изменяется уровень Ферми в донорном и акцепторном полупроводниках от температуры?
8. Что такое эффективная масса электрона?
9. Как изменяется концентрация электронов в донорном полупроводнике с температурой?
10. Как влияют донорные и акцепторные примеси на структуру энергетических уровней полупроводника?
11. Каковы возможные практические применения эффекта Холла?
12. Можно ли в полупроводнике, обладающем только собственной проводимостью, наблюдать эффект Холла?

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.

5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14

## Фотодиод

**Цель работы:** Исследование фотодиода.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Источник питания ИПС1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ОК01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

**Фотоэффект на  $p-n$ -переходе.** Рассмотрим контакт  $p$ -полупроводника и  $n$ -полупроводника ( $p-n$ -переход). В области контакта происходит изгиб энергетических зон, приводящий к их взаимному смещению. Это показано на рис. 1, где штриховой прямой изображен уровень энергии Ферми (в состоянии термодинамического равновесия положение уровня Ферми в  $p$ -области совпадает с его положением в  $n$ -области), 1 – дно зоны проводимости, 2 – потолок валентной зоны.

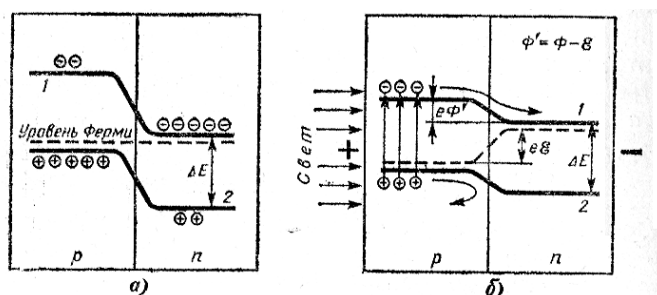


Рис. 1. Смещение энергетических зон.

Основными носителями заряда в  $p$ -области являются дырки; их концентрация много больше концентрации электронов проводимости. В  $n$ -области наблюдается обратная картина: там основными носителями являются электроны проводимости. Диффузии электронов проводимости из области с высокой их концентрацией ( $n$ -области) в область с низкой концентрацией (в  $p$ -область) препятствует потенциальный барьер высотой  $e\Phi$ ;  $\Phi$  – контактная разность потенциалов. Аналогичное замечание можно сделать относительно диффузии дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. Иными словами, контактная разность потенциалов в  $p-n$ -переходе препятствует уходу основных носителей из «своей» области. В то же время она способствует уходу в другую область неосновных носителей.

Предположим теперь, что на  $p$ -полупроводник с наружной стороны падает поток фотонов (рис.1,б). Энергия фотонов превышает ширину

запрещенной зоны. Фотоны генерируют электроны проводимости и дырки, которые, возникнув, начинают диффундировать через  $p$ -область по направлению к  $p$ - $n$ -переходу. Электроны проводимости являются для  $p$ -области неосновными носителями, поэтому внутреннее поле в  $p$ - $n$ -переходе «втягивает» их в  $n$ -область. Что же касается дырок, то они являются для  $p$ -области основными носителями, поэтому поле в  $p$ - $n$ -переходе задержит их и возвратит обратно в  $p$ -область. В результате происходит пространственное разделение оптически генерированных электронов и дырок;  $p$ -полупроводник приобретает положительный, а  $n$ -полупроводник – отрицательный заряд, что эквивалентно возникновению ЭДС. При этом уровни Ферми в  $p$ -области и  $n$ -области смещаются друг относительно друга на  $e\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – фотоЭДС; контактная разность потенциалов уменьшается на  $\varepsilon$  (рис.1б).

Внутренний фотоэффект, проявляющийся в возникновении фотоЭДС, называют также *фотогальваническим* (или *фотовольтаическим*) эффектом. Одним из видов этого эффекта является возникновение *вентильной* (барьерной) фотоЭДС в  $p$ - $n$ -переходе.

**Солнечные элементы.** Явление возникновения фотоЭДС в  $p$ - $n$ -переходе используется на практике для создания *солнечных элементов*, превращающих энергию излучения Солнца в электрическую энергию. Из солнечных элементов собирают солнечные батареи, применяемые в качестве источников питания различных наземных и космических объектов.

Большое практическое применение находят солнечные элементы на основе кремния (точнее говоря, на основе контакта  $p$ -Si и  $n$ -Si); КПД этих элементов достигает 15%. Применяются также элементы на основе арсенида галлия (GaAs). Имея несколько более низкий КПД, они в то же время характеризуются большей стойкостью к радиационным повреждениям.

Если фотодиод подключить в обратном направлении, то в отсутствие освещения через прибор протекает обычный обратный ток, обусловленный малым количеством неосновных носителей заряда, имеющих тепловое происхождение. При освещении, например, дырочной области полупроводника в фотодиоде генерируются электронно-дырочные пары. В результате диффузии дырки (основные носители) уходят либо к омическому контакту, либо на поверхность и там рекомбинируют. Электроны же (неосновные носители) диффундируют к переходу и втягиваются полем  $p$ - $n$ -перехода в электронную область прибора, значительно увеличивая величину обратного тока. Фототок при этом определяется в основном концентрацией неосновных носителей заряда, то

есть определяется интенсивностью света, а не приложенным обратным напряжением.

## Описание установки

Исследование фотодиода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ОК01 (рис. 2), источника питания ИПС1 и блока амперметра-вольтметра АВ1 (рис. 3).

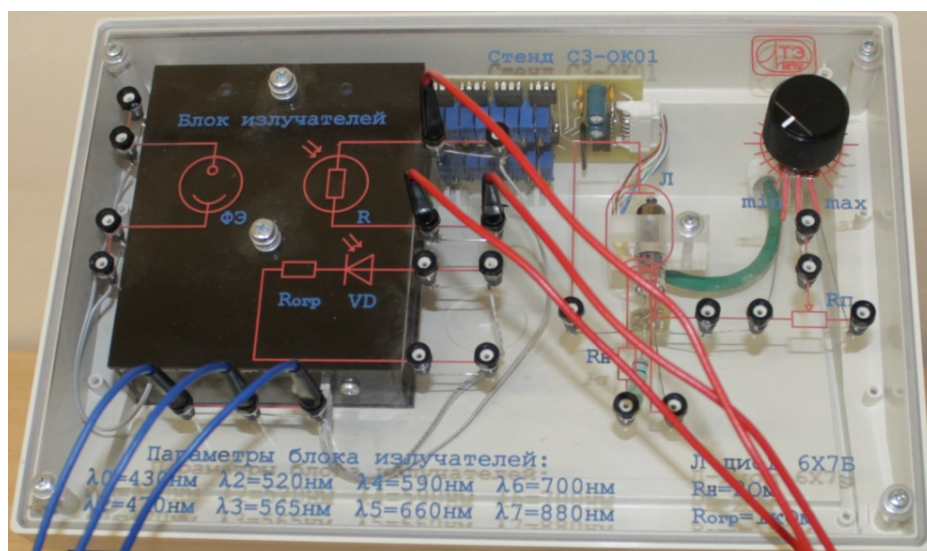


Рис. 2. Стенд СЗ-ТТ03.

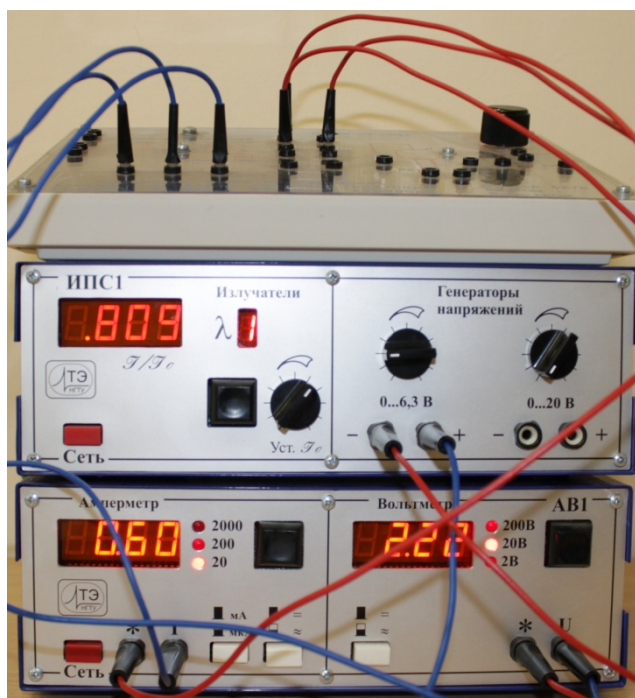


Рис. 3. Источник питания ИПС1 и блок амперметра-вольтметра АВ1.

В качестве источников света в лабораторной установке используется набор светодиодов (кластер), излучающих в различных узких диапазонах длин волн. Эти диапазоны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра.

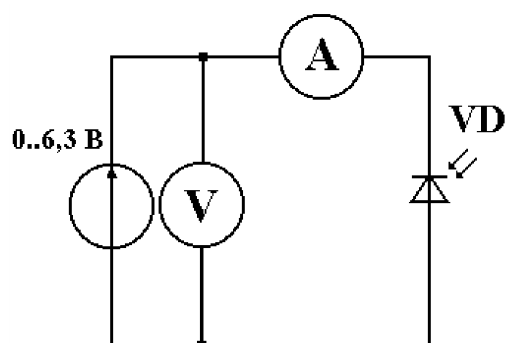


Рис. 4. Электрическая схема эксперимента для исследования фотодиодного режима.

На рис. 4 представлена электрическая схема для исследования фотодиодного режима. В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого постоянного напряжения блока ИПС1, работающий в диапазоне 0..6,3 В. Такое включение измерительных приборов позволяет исключить шунтирование вольтметром диода. При этом в рабочем диапазоне токов влияние внутреннего сопротивления амперметра на показания вольтметра незначительное.

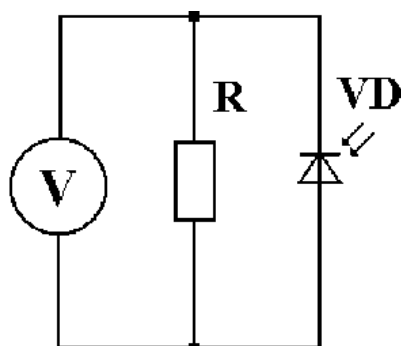


Рис. 5. Электрическая схема эксперимента для исследования вентильного режима.

На рис. 5 представлена электрическая схема для исследования вентильного режима фотодиода. Резистор необходим для того, чтобы исключить возможное детектирование сигнала наводки на провода собранной схемы. Если входное сопротивление вольтметра около 1 МОм, то данный резистор можно и не ставить.

При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке устанавливается не абсолютная, а относительная интенсивность излучения  $I/I_0$ . Где  $I_0$  – некоторая константа, задаваемая измерительным прибором и регулируемая пользователем.



## **Выполнение работы**

### **Исследование фотодиодного режима**

1. Собрать электрическую схему, представленную на рис. 4.
2. Измерить зависимость фототока от длины волны излучения.
3. Для длины волны с наибольшим током снять зависимость фототока от напряжения для нескольких (3х) значений интенсивностей. Убедитесь, что фототок практически не зависит от напряжения.
4. Снять зависимость фототока от интенсивности излучения. Убедиться в линейности этой зависимости.

### **Исследование вентильного режима**

1. Собрать электрическую схему, представленную на рис. 5.
2. Измерить зависимость фотоЭДС от интенсивности для двух длин волн.
3. Построить график полученных зависимостей.
4. Для максимального уровня излучения измерить зависимость фотоЭДС от длины волны. Построить график этой зависимости.

## **Контрольные вопросы**

1. Каковы физические принципы работы фотодиода?
2. Чем определяется выбор полупроводникового материала фотодиода?
3. В чём отличие вентильного и фотодиодного режимов работы?
4. Как влияет величина сопротивления нагрузки на фотоэлектрические характеристики фотодиода?
5. Почему невозможно осуществить идеальный режим короткого замыкания?
6. Почему зависимость тока короткого замыкания от величины светового потока существенно отклоняется от линейной при больших потоках?
7. Что такое режим холостого хода?
8. Чем определяется максимальное значение фото-ЭДС?
9. Чем определяется инерционность фотодиода?
10. Чем определяется инерционность фотоэлемента?

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15

### Внешний фотоэффект

**Цель работы:** Исследование характеристик фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Источник питания ИПС1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ОК01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Внешним фотоэффектом называется явление испускания электронов веществом под действием света, поглощаемого этим веществом. Работой выхода  $A_B$  называется наименьшая энергия, необходимая для освобождения электрона из данного вещества. Для электрона, которому достаточно для освобождения именно этой энергии и который поглотил фотон с энергией  $\hbar\omega$ , можно записать уравнение Эйнштейна

$$\hbar\omega = A_B + E_{\max}, \quad (1)$$

где  $E_{\max}$  – максимально возможная кинетическая энергия выбитых электронов,  $\hbar = 1.054 \times 10^{-34}$  Дж $\times$ с,  $\omega$  - циклическая частота световой волны. Так как началу фотоэффекта соответствует условие  $E_{\max} = 0$ , то из уравнения (1) следует выражение для циклической частоты красной границы фотоэффекта:

$$\omega_0 = \frac{A_B}{\hbar}. \quad (2)$$

Основными характеристиками фотоэлемента являются вольт-амперная, световая и спектральная характеристики.

**Вольт-амперные характеристики фотоэлемента**, полученные для одинаковой частоты, но различных интенсивностей света, представлены на рис.1. Участок  $AB$  графика соответствует току насыщения фотоэлемента  $I_H$ . Сила тока насыщения не зависит от напряжения между катодом и анодом потому, что все электроны, выбитые светом в область пространства между катодом и анодом, достигают анода. При напряжениях  $U < U_A$  электрическое поле между катодом и анодом недостаточно для того, чтобы при данной геометрии фотоэлемента собрать на аноде все выбитые электроны. Сила тока при этом меньше  $I_{\text{нас}}$ .

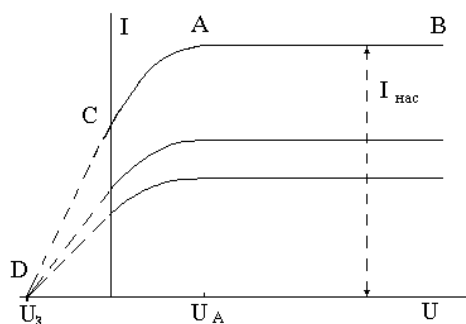


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента.

При некоторой разности потенциалов задерживающего поля  $U_3$  наступает состояние, когда электроны даже с самой высокой энергией, не долетают до анода и отбрасываются назад к катоду. Ток через фотоэлемент при этом становится равным нулю (точка  $D$  на графике).

**Световой характеристикой фотоэлемента** называется зависимость фототока насыщения от светового потока при неизменном его спектральном составе и постоянном напряжении:  $I_H = f(\Phi_v)_{U=const}$ . Световая характеристика вакуумного фотоэлемента носит линейный характер (при не слишком больших освещенностях фотокатода, когда не создается большого отрицательного заряда у фотокатода и может быть получен ток насыщения).

**Спектральной характеристикой фотоэлемента** называется зависимость фототока насыщения фотоэлемента от длины волны падающего света при неизменной величине потока монохроматического излучения разных длин волн:  $I_H = f(\lambda)_{\Phi_\lambda=const}$ .

Для значений  $\lambda > \frac{2\pi c}{\omega_0}$  ( $c$  – скорость света) фотоэффект не наблюдается, а значит сила фототока насыщения равна нулю. При уменьшении длины волны фототок быстро растет, достигая максимума при некоторой длине волны  $\lambda_1$ , затем уменьшается. При дальнейшем уменьшении длины волны может опять наблюдаться медленный рост фототока. Указанный характер спектральной характеристики связан с энергетическими состояниями свободных электронов и наблюдается у металлов.

Красная граница фотоэффекта для щелочных металлов соответствует энергии фотона  $\varepsilon_0 = 3-5$  эВ, а для остальных металлов - еще больше,  $\varepsilon_0 = 3-5$  эВ. Сказанное означает, что металлические фотоэммитеры нефоточувствительны в видимой области спектра и, кроме того, имеют, как показывает опыт, малый квантовый выход. Поэтому чистые металлы практически не используются в качестве фотоэммитеров в электровакуумных приборах. Эффективные фотоэммитеры в видимой и

ближней ультрафиолетовой областях спектра созданы на основе полупроводниковых материалов. При этом следует отметить, что переходя от металлов к полупроводникам, нужно применять в уравнении Эйнштейна (1) вместо работы выхода  $A_B$  энергию  $W$ , называемую **порогом фотоэффекта**:

$$\hbar\omega = W + E_{\max} . \quad (3)$$

Это связано с более сложным, чем у металлов, характером энергетических состояний электронов, способных покинуть полупроводник при фотоэффекте. Существенное влияние на фотоэмиссию оказывает примесь, добавленная в полупроводник, а также состояние его поверхности. При использовании полупроводниковых фотоэмиттеров порог фотоэффекта  $W = 1-2$  эВ.

### Описание установки

Исследование фотодиода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ОК01 (рис. 2), источника питания ИПС1 и блока амперметра-вольтметра АВ1 (рис. 3).

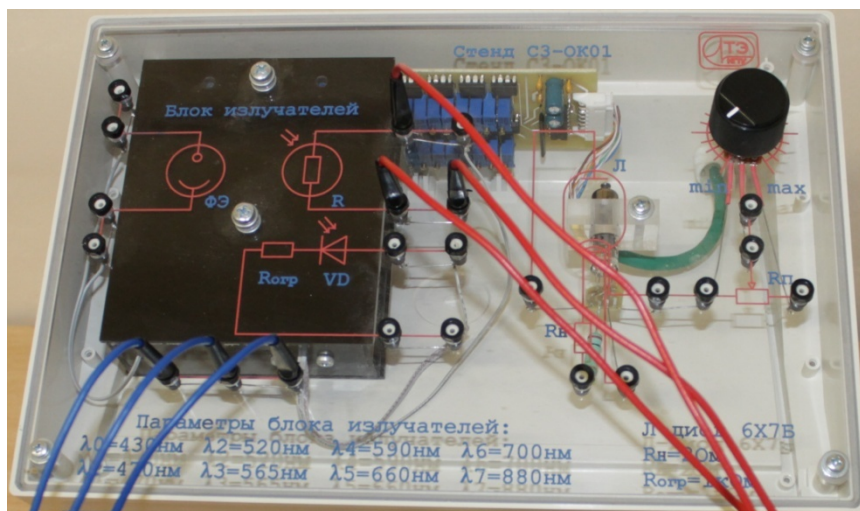


Рис. 2. Стенд СЗ-ТТ03.

В качестве источников света в лабораторной установке используется набор светодиодов (кластер), излучающих в различных узких диапазонах длин волн. Эти диапазоны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра. В качестве фотоэмиттера используется катод фотоэлемента (или полупрозрачный катод фотоэлектронного умножителя), изготовленный из полупроводникового вещества. Электроны, выбитые светом из катода, собираются анодом (роль анода у фотоэлектронного умножителя играют соединенные между собой диоды). Поскольку фотоэмиттер и анод обычно изготавливают из веществ, близких по электрофизическим

свойствам, контактную разность потенциалов между катодом и анодом можно считать малой.

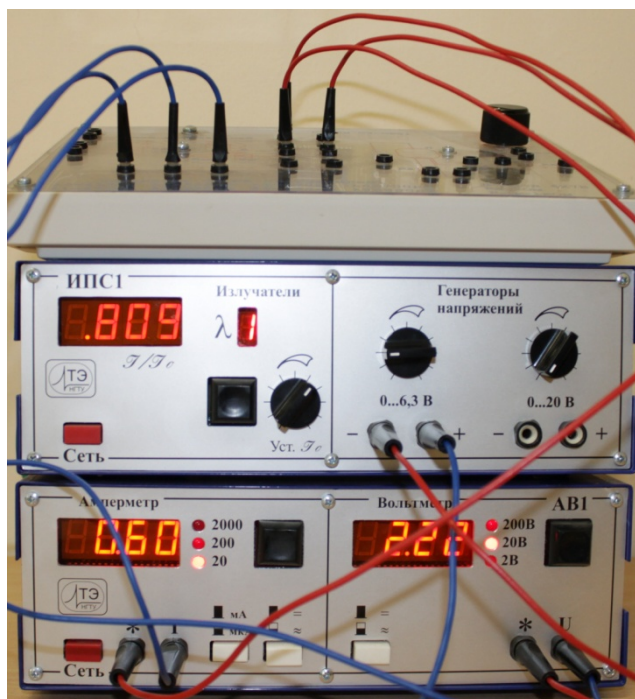


Рис. 3. Источник питания ИПС1 и блок амперметра-вольтметра АВ1.

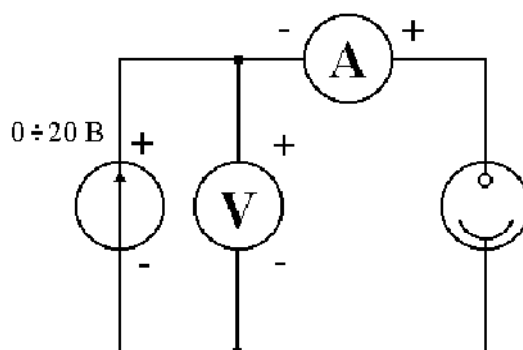


Рис. 4. Электрическая схема опыта.

На рис. 4 представлена электрическая схема опыта. В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого постоянного напряжения блока ИПС1, работающий в диапазоне 0–20 В. Необходимо обратить внимание на правильность подключения полярности амперметра. Такое включение обеспечивает подавление сетевых наводок в измерительной цепи. При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке измеряется не абсолютная, а относительная интенсивность излучения  $I/I_0$ , где  $I_0$  – некоторая константа, задаваемая измерительным прибором и регулируемая пользователем с помощью регулятора.

## Выполнение работы

1. Собрать схему, показанную на рис. 4.
2. Снять семейство вольтамперных характеристик  $I = f(U)_{I/I_0, \lambda = const}$ .
3. Снять семейство световых характеристик  $I_H = f(I/I_0)_{U = const, \lambda = const}$ , выбрав  $U$  в области тока насыщения.
4. Снять семейство спектральных характеристик  $I = f(\lambda)_{U = const, I/I_0 = const}$ , включая разные фотодиоды.
5. По данным пунктов 2, 3, 4 построить графики соответствующих зависимостей.
6. По спектральной характеристике оцените работу выхода (или порог фотоэффекта) и оцените вид материала, из которого сделан фотокатод (металл или полупроводник).

## Контрольные вопросы

1. Что называется внешним фотоэффектом?
2. Изобразите схему опыта А.Г. Столетова.
3. Дайте определение фототока насыщения.
4. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
5. Запишите уравнение Эйнштейна для внутреннего фотоэффекта.
6. Что называется вторичной электронной эмиссией. Изобразите схематично конструкцию фотоэлектронного умножителя.
7. Можно ли объяснить все особенности фотоэффекта пользуясь волновой теорией света?
8. Приведите примеры практического использования внешнего фотоэффекта.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>

3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16

## Внутренний фотоэффект.

**Цель работы:** Исследование характеристик фоторезистора.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Источник питания ИПС1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ОК01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

**Фоторезистором** называется полупроводниковый прибор, действие которого основано на фотопроводимости – изменении проводимости полупроводника при освещении (внутренний фотоэффект). В полупроводнике под действием света генерируются свободные носители заряда (в отличие от внешнего фотоэффекта, когда электроны под действием света выходят из вещества).

Электропроводность собственного полупроводника, обусловленная тепловым возбуждением, называется *темновой проводимостью*:

$$\sigma_T = q_e n (\mu_n + \mu_p), \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижность электронов и дырок соответственно,  $q_e$  – заряд носителя тока.

При освещении полупроводника возникают дополнительные свободные носители заряда, обусловленные внутренним фотоэффектом. При поглощении кванта света один из валентных электронов переходит в зону проводимости, а в валентной зоне образуется дырка. Очевидно, такой переход возможен, если энергия фотона  $h\nu$  равна или несколько больше ширины запрещенной зоны  $\Delta E$ :

$$h\nu \geq \Delta E. \quad (2)$$

Из сказанного ясно, что полная электропроводность складывается из темновой и фотопроводимости:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_\phi. \quad (3)$$

Основными характеристиками фоторезистора являются *вольт-амперная, световая и спектральная*.

**Вольт-амперной характеристикой** называется зависимость тока, протекающего через фоторезистор, от величины приложенного напряжения при постоянном световом потоке  $I = f(U)_{\Phi=Const}$ :

$$I_C = \frac{\sigma S}{l} U = \frac{(\sigma_T + \sigma_\Phi) S}{l} U = I_T + I_\Phi, \quad (4)$$

где  $I_C$  – световой поток,  $I_T$  – темновой поток,  $I_\Phi$  – фототок,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $l$  – длина проводника.

В частности, если световой поток равен нулю, то характеристика называется темновой. Из уравнения (4) видно, что вольт-амперная характеристика как темновая, так и при освещении является линейной, поскольку при постоянной температуре (ток, протекающий через фоторезистор, не должен приводить к разогреву полупроводникового прибора) и постоянном световом потоке электропроводность не зависит от напряжения. Следует отметить, что в области обычно реализуемых освещенностей световой ток намного больше темнового, т. е.  $I_C \approx I_\Phi$ .

**Световой характеристикой** фоторезистора называется зависимость фототока от величины падающего светового потока при постоянном значении приложенного напряжения  $I_\Phi = f(\Phi)_{U=Const}$ . Световая характеристика обычно нелинейная. При больших освещенностях увеличение фототока отстает от роста светового потока, намечается тенденция к насыщению. Это объясняется тем, что при увеличении светового потока наряду с ростом концентрации генерируемых носителей заряда растет вероятность их рекомбинации.

**Спектральной характеристикой** называется зависимость фототока от длины волны при постоянной энергии падающего излучения  $I_\Phi = f(\lambda)_{\Phi=Const, U=Const}$ . Фототок в собственном полупроводнике появляется, начиная с длины волны  $\lambda_0$  соответствующей равенству

$$\frac{hc}{\lambda_0} = \Delta E. \quad (5)$$

где  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны полупроводника,  $\lambda_0$  – край собственного поглощения,  $c$  – скорость света в вакууме.

Зная ширину запрещенной зоны можно определить полупроводник из которого сделан фоторезистор (таблица 1)

Таблица 1

Полупроводник	Ge	Si	InSb	GaAs	GaP	CdS	CdSe	PbS
$\Delta E, \text{эВ}$	0,72	1,12	0,17	1,42	2,26	2,42	1,70	0,41

С увеличением энергии фотона в реальной спектральной характеристике фототок быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что с уменьшением  $\lambda$  растет коэффициент оптического поглощения, а это приводит к поглощению света в тонком приповерхностном слое вещества, к повышению концентрации неравновесных носителей и соответственно повышенной скорости рекомбинации в этом слое.

### Описание установки

Исследование фотодиода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ОК01 (рис. 1), источника питания ИПС1 и блока амперметра-вольтметра АВ1 (рис. 2).

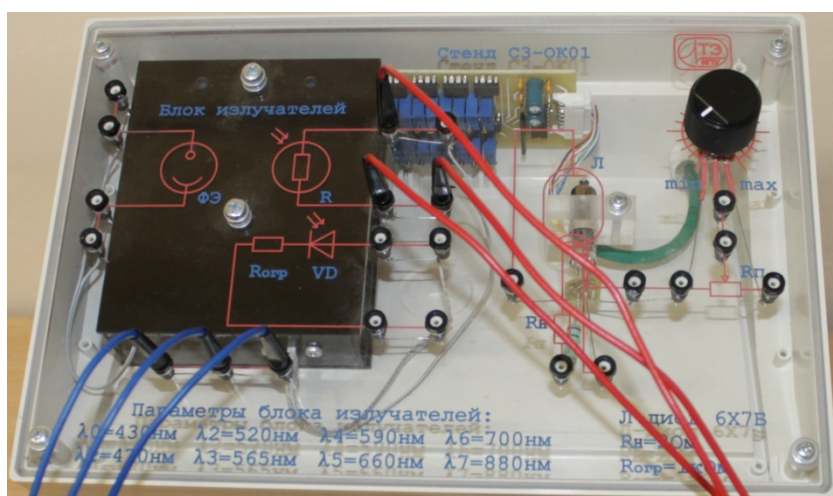


Рис. 1. Стенд СЗ-ТТ03.

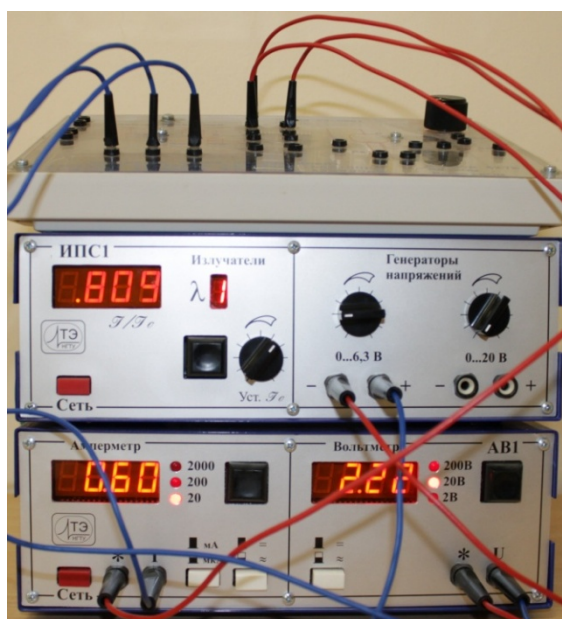


Рис. 2. Источник питания ИПС1 и блок амперметра-вольтметра АВ1.

В качестве источников света в лабораторной установке используется набор светодиодов (кластер), излучающих в различных узких диапазонах длин волн. Эти диапазоны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра.

На рис. 3 представлена электрическая схема. В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого постоянного напряжения блока ИПС1, работающий в диапазоне **0..6,3 В**. Такое включение измерительных приборов позволяет исключить шунтирование вольтметром фоторезистора. При этом в рабочем диапазоне токов влияние внутреннего сопротивления амперметра на показания вольтметра незначительное.

При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке устанавливается не абсолютная, а относительная интенсивность излучения  $I/I_0$ . Где  $I_0$  – некоторая константа, задаваемая измерительным прибором и регулируемая пользователем.

### Выполнение работы

1. Собрать электрическую схему, показанную на рис. 3.

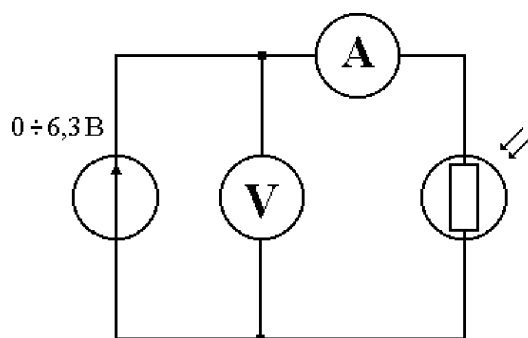


Рис. 3. Электрическая схема опыта.

2. Снять семейство вольтамперных характеристик  $I = f(U)_{I/I_0 = \text{const}, \lambda = \text{const}}$ .
3. Снять семейство световых характеристик  $I_\phi = f(I/I_0)_{U = \text{const}, \lambda = \text{const}}$ .
4. Снять семейство спектральных характеристик  $I_\phi = f(\lambda)_{U = \text{const}, I/I_0 = \text{const}}$ .
5. По результатам измерений, проведенных согласно пунктам 2, 3, 4, постройте графики вольт-амперных, световых и спектральной характеристик фоторезистора.
6. Определите по спектральной характеристике край собственного поглощения  $\lambda_0$ . Оцените ширину запрещенной зоны полупроводника  $\Delta E$ , из которого сделан фоторезистор, по формуле (5). Запишите полученное значение в электрон-вольтах. Определите, пользуясь таблицей 1, полупроводник, из которого сделан фоторезистор.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение спектральной чувствительности фотоэлемента. Какова формула для расчета спектральной чувствительности фотоэлемента?
2. Что называется интегральной чувствительностью фотоэлемента? Какой формулой пользуются для расчета интегральной чувствительности фотоэлемента?
3. Каков механизм фотопроводимости собственных полупроводников?
4. Каков механизм фотопроводимости примесных полупроводников?
5. Что называется красной границей фотоэффекта? Объясните, почему у большинства чистых полупроводников красная граница находится в видимой области спектра, а у примесных в инфракрасной области?
6. Опишите конструкцию фоторезистора. Где используются фоторезисторы?
7. Может ли фотосопротивление работать при переменном напряжении?
8. Объясните характер зависимостей фототока от напряжения и освещенности.
9. Практическое применение внутреннего фотоэффекта.
10. Изобразите схематично зонные диаграммы проводника, полупроводника и диэлектрика.
11. Какие процессы происходят в полупроводнике при поглощении фотона?
12. Запишите закон сохранения энергии для внутреннего фотоэффекта.

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с.  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.

5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.
10. Аскеров В.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука, 1985.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №17

## Контактная разность потенциалов

**Цель работы:** Исследование характеристик фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

**В работе используются:**

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
2. Блок генератора напряжений ИПС1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ОК01.
4. Соединительные провода с наконечниками.

### Теоретическая часть

Принцип работы любой электронной лампы заключается в том, что между ее катодом (эмиттером) и анодом (коллектором) создается электрическое поле, под воздействием которого находятся эмитированные катодом электроны. Создавая поле, ускоряющее или замедляющее электроны при их движении к аноду, можно управлять электрическим током, протекающим через лампу.

В настоящей лабораторной работе используется вакуумный диод. Он представляет собой электронную лампу, имеющую два электрода: подогреваемый электрической спиралью катод и анод. Эмитированные из нагретого катода электроны, достигая анода, создают электрический ток, протекающий через вакуумное пространство диода.

В вакуумном диоде зависимость силы тока анода  $I_A$  от величины задерживающего отрицательного напряжения  $U_A$  между катодом и анодом при температуре катода  $T$  имеет вид

$$I_A = I_\varepsilon \exp\left(\frac{eU_A}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $I_\varepsilon$  – сила тока при нулевом напряжении между катодом и анодом,  $e$  – элементарный электрический заряд.

### Описание установки

Исследование фотодиода производится с помощью модульного учебного стенда СЗ-ОК01 (рис. 1), источника питания ИПС1 и блока амперметра-вольтметра АВ1 (рис. 2).





Основным элементом схемы является вакуумный диод 1. Нагрев (накал) катода этой радиолампы осуществляется с помощью спирали (нити) из тугоплавкого металла, помещенной внутрь катода, электрический ток через которую поддерживает генератор переменного напряжения 6. Сила тока накала, а, следовательно, температура катода может изменяться ступенчато путем подключения последовательно с нитью накала резисторов  $R_{T1} \div R_{T3}$ . Разность потенциалов между катодом и анодом создается с помощью генератора напряжения 4. Путем переключения проводников «а» и «б» можно создать на аноде как положительный, так и отрицательный потенциал относительно катода. Регулировка этого напряжения осуществляется переменным резистором  $R_{П}$ . Сила анодного тока измеряется микроамперметром 3, а напряжение между катодом и анодом  $U_V$  – вольтметром 2.

### Контактная разность потенциалов

Важно отметить, что вольтметр измеряет не истинное значение напряжения между катодом и анодом  $U_A$ , а только напряжение  $U_V$ , задаваемое генератором. Между тем, на потенциал анода оказывает существенное влияние, так называемая, контактная разность потенциалов  $U_{\text{конт}}$ . Ее возникновение связано с тем, что катод и анод электронной лампы сделаны из различных материалов. Эти вещества, даже при одинаковых внешних условиях, отличаются друг от друга значением химического потенциала свободных носителей заряда. При соединении катода и анода любыми промежуточными проводниками между ними в силу указанных различий происходит диффузия свободных носителей заряда, которая вначале носит неравновесный характер, т. е. из вещества с большим значением химического потенциала в вещество с меньшим значением химического потенциала переходит больше носителей заряда, чем наоборот. Этот процесс продолжается до установления равновесного состояния, при котором значения химических потенциалов становится одинаковыми. В результате один из электродов теряет, а другой получает электроны и между катодом и анодом устанавливается контактная разность потенциалов, которая изменяется при нагревании катода. Следует отметить, что обычно анод приобретает за счет контактной разности потенциалов отрицательный потенциал относительно катода.

Из сказанного следует, что истинное напряжение  $U_A$  между катодом и анодом определяется алгебраической суммой напряжения  $U_V$ , которое измеряется вольтметром, и контактной разности потенциалов  $U_{\text{конт}}$ :

$$U_A = U_V + U_{\text{конт}}. \quad (2)$$

Это в свою очередь означает, что нулевое истинное напряжение между катодом и анодом  $U_A = 0$  наблюдается, когда напряжение,

измеренное вольтметром, равно по величине и противоположно по знаку контактной разности потенциалов  $U_{\text{конт}}$ :

$$U_V = -U_{\text{конт}}. \quad (3)$$

### Определение температуры $T$

Экспериментальное определение температуры и одновременное определение контактной разности потенциалов можно осуществить, пользуясь следующей методикой. Прологарифмируем выражение (1):

$$\ln I_A = \ln I_\varepsilon + \frac{eU_A}{kT}. \quad (4)$$

Из полученного выражения (4) видно, что при  $I_\varepsilon = \text{const}$ , график зависимости  $\ln I_A$  от  $U_A$  является линейным, причем коэффициент наклона графика обратно пропорционален температуре. Следовательно, измерив силу тока через лампу при различных напряжениях между катодом и анодом и построив график этой зависимости, по тангенсу угла наклона графика находим температуру электронного газа:

$$\text{tg}\alpha = \frac{\Delta(\ln I_A)}{\Delta U_A} = \frac{e}{kT}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива только для отрицательных анодных напряжений. При положительных напряжениях на аноде (ускоряющее поле) рост анодного тока замедляется, а в режиме насыщения почти прекращается, при этом зависимость  $\ln I_A = f(U)$  сохраняет линейный характер.

### Определение $U_{\text{конт}}$

Как отмечалось выше, истинное анодное напряжение является алгебраической суммой напряжений  $U_V$  и  $U_{\text{конт}}$  (2). Поэтому излом прямой  $\ln I_A = f(U)$  наступает при выполнении условия (3), то есть в точке перехода от тормозящего поля к полю ускоряющему. Значит, построив график  $\ln I_A = f(U_V)$  (рис. 4), по наклону прямой  $a-b$  (участок тормозящего поля) находим, пользуясь формулой (5), температуру электронного газа, а по точке излома прямых  $a-b$  и  $c-d$ , пользуясь формулой (3), находим контактную разность потенциалов.

Изменение наклона линейной зависимости при переходе от тормозящего к ускоряющему полю происходит не скачком, а постепенно (участок  $b-f-c$ ). Поэтому для определения точки, которая соответствует нулевому значению истинного напряжения  $U_A = 0$ , необходимо экстраполировать прямолинейные участки графика  $a-b$  и  $c-d$  до их пересечения в точке  $e$ .

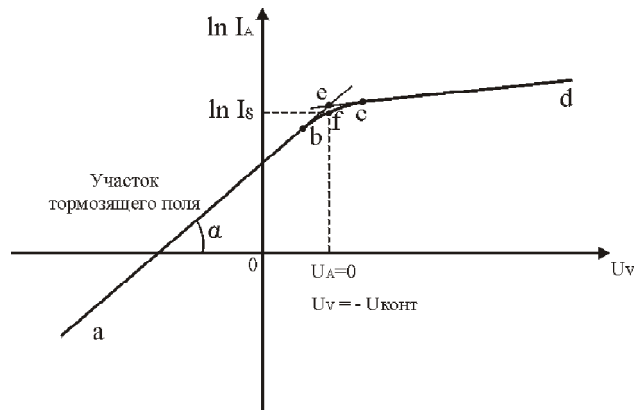


Рис. 4. Зависимость  $\ln I_A = f(U_V)$ .

## Выполнение работы

1. Соберите электрическую схему, представленную на рис. 1. Включите в цепь накала сопротивление  $R_{T3}$ . Установите максимальное напряжение накала (6,3 В). Все измерения проводите через 3 мин после включения генератора.
2. Снимите прямую и обратные ветви зависимости силы анодного тока  $I_A$  от напряжения  $U_V$ , меняя напряжение резистором  $R_{T1}$  через  $\Delta 0,05$  В. Для того чтобы внутреннее сопротивление вольтметра, подключенного параллельно диоду, не вносило существенную погрешность в измеряемую микроамперметром силу анодного тока, начинайте измерения с токов не меньших 5 мкА. Чтобы не перегреть тепловым излучением катода анод лампы, что искажает величину анодного тока, отключите генератор переменного напряжения на время проведения последующих вычислений и построения графика.
3. Постройте график зависимости  $\ln I_A = f(U_V)$ .
4. Путем экстраполяции прямолинейных участков графика до их пересечения найдите точку  $e$  (см. рис. 4), а по ней, пользуясь формулой (3), определите знак и величину контактной разности потенциалов  $U_{\text{конт}}$ .
5. Определите тангенс угла наклона графика в области тормозящего поля и по формуле (5) вычислите температуру катода и электронного газа вокруг него.
6. Повторите измерения и вычисления п. 3–9, подключая вместо сопротивления  $R_{T3}$  в цепь накала катода сопротивления  $R_{T2}$ ,  $R_{T1}$  и, наконец, подключив накал напрямую.
7. Постройте график зависимости контактной разности потенциалов от температуры катода  $U_{\text{конт}}(T)$ .

## Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникает контактная разность потенциалов?
2. Сформулируйте закон Вольта. Запишите математическое выражение первого закона Вольта.
3. Пользуясь математическим выражением первого закона Вольта, покажите, что контактная разность потенциалов цепи, состоящей из четырех разных металлов, при одинаковой температуре контактов зависит только от крайних металлов.
4. Объясните возникновение термоэдс в замкнутой цепи, состоящей из двух металлов.
5. Какое практическое применение термоэлектрических явлений?
6. Каков физический механизм возникновения контактной разности потенциалов?
7. Запишите аналитическое выражение для эффекта Зеебека.
8. Что представляет собой термопара? Где находят применение термопары?
9. Какими преимуществами обладают термопары по сравнению с другими устройствами для измерения температуры?
10. Что представляют собой металлы согласно зонной теории? Что такое уровень Ферми; энергия Ферми? Что происходит с уровнем Ферми при изменении температуры металла?

## Список литературы

1. Гольдаде В. А. Физика конденсированного состояния / В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук. - Минск: Белорусская наука, 2009. - 648 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309>
2. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 294 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=95477>
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Лань, 2010. – 392 с.
4. Зегря Г.Г., Перель В.И.. Основы физики полупроводников.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009 г.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. - М. Лань, 2008. – 616 с.
6. Смит Р. Полупроводники. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
7. Данилов И.А., Иванов П.М.. Электротехника.- М. : Выс. школа. 2005.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В.. Общая электротехника с основами электроники.- М. : Выс. школа.2005.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гарда. 2003.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 Исследование ВАХ металла при различных температурах .....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Исследование ВАХ полупроводника при различных температурах .....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Исследование ВАХ диода при различных температурах .....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Исследование ВАХ диода Шоттки при различных температурах .....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 Исследование ВАХ стабилитрона при различных температурах .....	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 Изучение работы p-n перехода .....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 Пробой p-n перехода .....	56
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 Контакт металл-полупроводник .....	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 Измерение температуры и интегрального коэффициента излучения тела методом спектральных отношений .....	66
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 Исследование электропроводности металлов .....	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11 Исследование электропроводности полупроводников .....	76
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 Определение ширины запрещенной зоны полупроводников .....	81
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13 Эффект Холла в примесных полупроводниках .....	85
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14 Фотодиод .....	93
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №15 Внешний фотоэффект .....	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16 Внутренний фотоэффект .....	105
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №17 Контактная разность потенциалов .....	111

Учебное издание

Афонин Геннадий Витальевич, Кончаков Роман Анатольевич,  
Померанцев Юрий Александрович, Гольдфарб Михаил Владимирович,  
Хоник Виталий Александрович

**Физика конденсированного состояния**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов бакалавриата и магистратуры физико-  
математического факультета*