

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.А. ПОТАПОВ

МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Казань 2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.А. ПОТАПОВ

МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Программа, методические указания
и контрольная работа

Казань 2009

УДК 621.38

ББК 32.85

A72

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий
кафедрой физики института электроэнергетики и электроники
Казанского государственного энергетического университета *В.Л. Матухин*;
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
заместитель декана заочного факультета Казанского государственного
энергетического университета *Т.К. Филимонова*.

Потапов А.А.

A72 Материалы и элементы электронной техники: Программа, методические указания и контрольная работа / А.А. Потапов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009, – 44 с.

Приведены общие рекомендации по работе над курсом, программа дисциплины, методические указания по изучению курса, варианты контрольного задания и примеры выполнения заданий контрольной работы.

Предназначено для студентов заочной формы обучения специальностей «Промышленная электроника» 210106.65 и 210102 «Светотехника и источники света»

УДК 621.38

ББК 32.85

© Потапов А.А., 2009

© Казанский государственный энергетический университет, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с разработкой и освоением новых материалов. Именно материалы стали ключевым звеном, определяющим успех многих инженерных решений при создании сложнейшей электронной аппаратуры. Поэтому изучению материалов электронной техники в вузах отводится значительное место, так как специалистам необходимы знания о закономерностях поведения материалов в различных условиях эксплуатации.

Целью изучения курса «Материалы и элементы электронной техники» является формирование знаний по классификации, назначению и применению материалов электронной техники, физической сущности процессов, определяющих свойства материалов, технологии получения и методов контроля их свойств.

В соответствии с государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования студент, изучивший курс «Материалы и элементы электронной техники» должен **знать**:

- понятийный аппарат (терминологию) дисциплины;
- физическую сущность процессов и явлений, протекающих в проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах в различных условиях эксплуатации;
- общие свойства различных групп материалов, используемых в электронных приборах и устройствах;
- методы расчета основных параметров элементов электронной техники;
- основные характеристики материалов: электрические, оптические, тепловые, механические и т.д.;
- физические и математические модели процессов и явлений, основные законы и закономерности, на которых основано применение различных материалов в электронных приборах;

понимать:

- возможность осуществления физических процессов и явлений в приборах и устройствах электронной техники;
- особенности использования электронных приборов в радиоэлектронной аппаратуре;
- принцип построения и реализации электронных приборов;

уметь пользоваться различными законами и закономерностями для объяснения физических принципов функционирования электронных приборов.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАБОТЕ НАД ДИСЦИПЛИНОЙ «МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

Работа студента над дисциплиной складывается из следующих элементов: самостоятельное изучение тем дисциплины по учебникам и учебным пособиям с последующей самопроверкой и решением типовых задач; индивидуальные консультации; посещение установочных лекций, практических занятий, лабораторного практикума; выполнение контрольной работы; сдача экзамена по всей дисциплине.

Самостоятельная работа с литературой

Освоение дисциплины следует начинать с уяснения его целей и задач. При первом чтении изучаемой темы необходимо получить общее представление об излагаемых вопросах, выделить основные понятия и отметить непонятные места. Затем отыскать в соответствующих справочных материалах ответы на появившиеся вопросы. При повторном чтении следует законспектировать тему с необходимыми пояснениями и ссылками.

Переходить к изучению новой темы следует только после полного изучения теоретических вопросов и выполнения самопроверки.

Самопроверка

Закончив изучение темы, ответьте на вопросы для самопроверки, внесите коррективы в конспект, который впоследствии поможет при повторении материала в период подготовки к экзамену.

Контрольное задание

В процессе изучения дисциплины «Материалы и элементы электронной техники» студент самостоятельно выполняет контрольную работу, которая является формой методической помощи при изучении дисциплины. Преподаватель-рецензент указывает студенту на недостатки в усвоении материала дисциплины, что позволяет устранить их.

Консультации

При возникновении затруднений при проработке теоретического материала следует чётко сформулировать вопросы, ответы на которые можно бу-

дет получить в ходе индивидуальных письменных и устных консультаций или после обзорных лекций по соответствующим темам.

Лекции

В период установочной сессии студентам читаются лекции обзорного характера по наиболее важным темам дисциплины, а также рассматриваются вопросы, недостаточно полно освещенные в учебной литературе или вызывающие затруднения у большого числа студентов.

Практические занятия

Для приобретения практических навыков расчета физических процессов, протекающих в твердых телах, проводятся практические занятия.

Лабораторные занятия

Для более глубокого изучения дисциплины и получения навыков исследования различных материалов электроники проводятся лабораторные занятия.

Экзамен

К сдаче экзамена по дисциплине «Материалы и элементы электронной техники» допускаются студенты, имеющие зачетную контрольную работу и зачет по лабораторным занятиям.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ОПД.Ф.2 «Материалы и элементы электронной техники» из цикла базовых дисциплин учебного плана направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» заочного факультета КГЭУ.

Учебный план по дисциплине для специальностей 210106.65 – «Промышленная электроника» и 210102.65 «Светотехника и источники света»

Семестры	Экзамены	Контрольные работы	Часы учебных занятий				Самостоятельная работа
			Всего	Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
4	1	1	200	14	4	4	178

Самостоятельное изучение

Раздел 1. Общие сведения о материалах электронной техники

Введение. Общая классификация материалов по составу, свойствам и техническому назначению. Структура атомов. Виды химической связи. Особенности строения твердых тел. Кристаллы. Дефекты в строении кристаллических тел. Динамика кристаллической решетки. Энергетические зоны в кристаллах.

Раздел 2. Металлы и сплавы

Общие сведения о проводниках, характеристика проводящих и резистивных материалов во взаимосвязи с их применением в электронной технике. Физическая природа электропроводности металлов и сплавов. Влияние температуры, примесей и других структурных дефектов на удельное сопротивление металлов. Сверхпроводящие металлы и сплавы.

Раздел 3. Полупроводниковые материалы

Характеристика и основные физико-химические, электрические и оптические свойства элементарных полупроводников, полупроводниковых со-

единений и твердых растворов на их основе. Концентрация носителей в собственных и примесных полупроводниках. Процессы переноса носителей заряда в полупроводниках, физическая природа электропроводности полупроводников. Неравновесные носители заряда. Электропроводность в сильных электрических полях. Контактные явления в полупроводниках. Контакт металл-полупроводник. Электронно-дырочный и гетеропереходы. Электрический пробой. Эффект Холла. Германий, кремний, арсенид галлия, карбид кремния. Примеры реализации полупроводниковых структур в приборах и устройствах электроники.

Раздел 4. Диэлектрические материалы

Основные физические процессы в диэлектриках и способы их описания. Электропроводность диэлектриков. Фазовые переходы. Классификация диэлектриков по типам структур. Электрическая прочность и пробой. Электрическая поляризация и диэлектрические потери. Основные уравнения пьезоэффекта и электрострикции. Пьезопреобразователи энергии электрических сигналов. Полярные диэлектрики. Электреты. Пирозлектрики и их техническое применение. Нелинейные диэлектрики и их применение. Электрооптические и акустооптические эффекты, их применение. Диэлектрические среды для генерации когерентного излучения и преобразования частоты.

Раздел 5. Магнитные материалы

Применение магнитных материалов в электротехнике. Намагниченность и магнитная проницаемость ферромагнетиков. Ферромагнетики в переменных магнитных полях. Магнитные свойства ферритов. Магнитные пленки. Методы исследования материалов и элементов электронной техники.

Содержание лекций

Лекция 1. Обзорная лекция по разделу 1 «Общие сведения о материалах электронной техники» (2 часа).

Лекция 2. Обзорная лекция по разделу 2 «Металлы и сплавы» (2 часа).

Лекция 3. Обзорная лекция по разделу 3 «Полупроводниковые материалы» (2 часа).

Лекция 4. Обзорная лекция по разделу 3 «Различные виды контактов» (2 часа).

Лекция 5. Обзорная лекция по разделу 3 «Электронно-дырочный переход» (2 часа).

Лекция 6. Обзорная лекция по разделу 4 «Диэлектрические материалы» (2 часа).

Лекция 7. Обзорная лекция по разделу 5 «Магнитные материалы» (2 часа).

Содержание практических занятий

Практическое занятие 1. Строение атома и химическая связь в веществах (2 часа).

Практическое занятие 1. Собственные и примесные полупроводники. Электропроводность полупроводников (2 часа).

Содержание лабораторного занятия

Лабораторное занятие 1. Исследование сегнетоэлектриков (4 часа).

Список рекомендуемой литературы

1. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. В 2 т. Т. 1. – М.: Академия, 2006. – 448 с.
2. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. В 2 т. Т. 2. – М.: Академия, 2006. – 384 с.
3. Гуртов В.А., Осауленко Р.Н. Физика твердого тела для инженеров: Учеб. пособие. М.: Техносфера, 2007. – 520 с.
4. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники: задачи и вопросы. – СПб.: Лань, 2003. – 208 с.
5. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 522 с.
6. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учебное пособие. – М.: Техносфера, 2005. – 408 с.
7. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

Программа дисциплины состоит из 5 разделов. Ниже по каждому разделу приводятся ссылки с указанием источника, где излагается данная тема. Номер учебника, указанный в квадратных скобках, соответствует его номеру в приведенном в конце списке литературы. В завершении каждого раздела приведены вопросы и задания для самопроверки, к которым следует приступить после изучения соответствующей темы.

Раздел 1. Общие сведения о материалах электронной техники

Литература: [1], с. 13–40; [3], с. 11–20, 32–40, 56–70, 91–11, 167–170, 185–186, 297–301.

Вопросы для самопроверки:

1. Приведите общую классификацию материалов, используемых в электронной технике.
2. Назовите 4 квантовых числа.
3. Каковы основные виды химической связи в материалах?
4. Чем обусловлена химическая связь в материалах?
5. В чем отличие монокристаллов, поликристаллов и аморфных веществ?
6. Назовите виды сингоний.
7. Что такое элементарная ячейка?
8. Назовите основные виды дефектов.
9. Какие дефекты относятся к одномерным?
10. Какие дефекты относятся к двумерным?
11. Что такое фононы?
12. Почему при образовании твердого тела энергетические уровни атомов расщепляются в энергетические зоны?
13. Чем различаются зонные структуры проводника, полупроводника и диэлектрика?

Раздел 2. Металлы и сплавы

Литература: [1], с. 51–91; [3], с. 326–333, 359–378.

Вопросы для самопроверки:

1. Какие основные виды проводников электрического тока вам известны?
2. Каков физический смысл уровня Ферми?
3. Дайте определение удельного сопротивления проводников.
4. В каких единицах измеряется удельное сопротивление проводников?
5. Почему металлы обладают высокой электрической проводимостью?
6. Как объяснить возрастание удельного сопротивления металлов при нагревании?
7. Сформулируйте определение температурного коэффициента удельного сопротивления.
8. Почему удельное сопротивление металлических сплавов типа твёрдых растворов выше, чем у чистых металлов, являющихся компонентами сплава?
9. Что такое сверхпроводимость?
10. Укажите основные свойства и области применения проводниковых материалов.

Раздел 3. Полупроводниковые материалы

Литература: [1], с. 146–204; [3], с. 338–339, 414–425, 440–445.

Вопросы для самопроверки:

1. Какой полупроводник называют собственным?
2. Как меняется собственная концентрация носителей заряда при изменении температуры?
3. Как происходит тепловая генерация носителей заряда?
4. Какие факторы влияют на подвижность носителей заряда?
5. Какие энергетические зоны есть в полупроводнике?
6. Как влияет ширина запрещенной зоны на концентрацию носителей заряда?
7. Как влияет положение уровня Ферми на концентрацию свободных электронов и дырок?
8. Какие электроны являются свободными носителями заряда?
9. Что такое дырка?
10. Как зависит удельное электрическое сопротивление полупроводника от температуры?
11. Из каких составляющих складывается полный ток через полупроводник?

12. Какие носители заряда называют основными и неосновными?
13. Как происходит генерация носителей заряда в донорном и акцепторном полупроводнике?
14. Какие примеси являются донорами, а какие акцепторами?
15. Где располагается уровень Ферми в примесных полупроводниках?
16. Почему в собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок равны?
17. Какие процессы называются генерацией и рекомбинацией?
18. Что такое инжекция и экстракция?
19. Что такое дрейф носителей заряда?
20. Что такое диффузия носителей заряда?
21. Как образуется область пространственного заряда?
22. Как влияет ширина ОПЗ на барьерную емкость?
23. Запишите закон действующих масс.
24. Как относятся концентрации галлия и мышьяка в собственном арсениде галлия?
25. Как изменяется удельная электропроводность при увеличении ширины запрещенной зоны?
26. От чего зависит удельное сопротивление полупроводника?
27. Как с помощью эффекта Холла определить тип электропроводности полупроводника?
28. В каких полупроводниках можно наблюдать эффект Ганна?

Раздел 4. Диэлектрические материалы

Литература: [1], с. 301–370; [2], с. 7–100; [3], с. 251–281.

Вопросы для самопроверки:

1. Какими свойствами характеризуются диэлектрические материалы?
2. Какие механизмы электропроводности в диэлектриках вы знаете?
3. Что является носителями заряда в диэлектриках?
4. Что такое поляризация и диэлектрическая проницаемость?
5. Как влияет температура удельную проводимость диэлектриков?
6. Какие виды поляризации сопровождаются потерями энергии?
7. Назовите и поясните виды диэлектрических потерь?
8. Чем характеризуются потери энергии в диэлектриках?
9. Что такое угол диэлектрических потерь?
10. Что понимает полярными и неполярными диэлектриками?

11. Что характеризует диэлектрическая проницаемость?
12. Каковы отличительные особенности сегнетоэлектриков?
13. Какие параметры сегнетоэлектрика можно определить с помощью петли гистерезиса?
14. Что называется точкой Кюри?
15. Какая электрическая упорядоченность свойственна сегнетоэлектрикам?
16. Каков микроскопический механизм спонтанной поляризации титаната бариума?
17. Что такое прямой и обратный пьезоэффект?
18. Чем отличается обратный пьезоэффект от электрострикции?
19. В каких диэлектриках можно наблюдать пьезоэффект?
20. Применение пьезоэффекта.
21. Что такое пирозлектрический эффект?
22. Где применяются пирозлектрики?
23. Какова природа заряда в электретах?

Раздел 5. Магнитные материалы

Литература: [2], с. 147–202; [3], с. 218–248.

Вопросы для самопроверки:

1. Как классифицируют магнитные материалы по свойствам и техническому назначению?
2. Какие механизмы перемагничивания обуславливают гистерезисные свойства ферромагнетиков?
3. Объясните зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.
4. Назовите основные виды потерь в ферромагнитных сердечниках.
5. Что представляет собой феррит и почему ферритовые сердечники можно использовать на высоких частотах?
6. Назовите области применения ферритов.
7. Назовите характеристики магнитомягких материалов.
8. Назовите важнейшие характеристики магнитотвердых материалов.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Каждый студент выполняет задание в соответствии со своим вариантом (см. таблицу 1). Номер варианта обозначен цифрой номера зачетной книжки.

1) Для собственного полупроводника, имеющего определенную температуру определить ширину запрещенной зоны; концентрацию носителей заряда; эффективные плотности состояний; положение уровня Ферми; подвижности носителей заряда; удельное электрическое сопротивление; отношение полного тока, протекающего через полупроводник к дырочному току.

2) Для полупроводника p -типа с концентрацией акцепторных примесей N_a определить концентрацию основных и неосновных носителей заряда; положение уровня Ферми; удельное электрическое сопротивление; отношение полного тока, протекающего через полупроводник к дырочному току.

3) Для полупроводника n -типа с концентрацией донорных примесей N_d определить концентрацию основных и неосновных носителей заряда; положение уровня Ферми; удельное электрическое сопротивление; отношение полного тока, протекающего через полупроводник к дырочному току.

4) Считая, что из полупроводников p - и n -типа изготовлен p - n -переход, определить контактную разность потенциалов; ширину обедненных областей и ширину области пространственного заряда; величину заряда на единицу площади; величину барьерной емкости без внешнего напряжения и при обратном напряжении $U_{обр} = -5$ В; коэффициенты диффузии и диффузионную длину носителей заряда; ток насыщения (обратный ток).

5) Графическая часть. Построить график распределения напряженности электрического поля в области пространственного заряда. Построить вольт-фарадную характеристику перехода. Построить вольт-амперную характеристику перехода. Построить энергетическую диаграмму p - n -перехода с указанием энергетических уровней, контактной разности потенциалов, области пространственного заряда.

Данные для расчета приведены в таблице 1. Параметры полупроводников, необходимые для расчета, сведены в таблице 2.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Вар-т	Материал п/п	Темпера- тура T , К	Концентрация примесей		Площадь пере- хода S , мм ²
			N_a , м ⁻³	N_d , м ⁻³	
1	Si	150	$1 \cdot 10^{19}$	$30 \cdot 10^{20}$	1
2	Ge	160	$2 \cdot 10^{20}$	$29 \cdot 10^{21}$	2
3	GaAs	170	$3 \cdot 10^{19}$	$28 \cdot 10^{20}$	3
4	Si	180	$4 \cdot 10^{20}$	$27 \cdot 10^{21}$	4
5	Ge	190	$5 \cdot 10^{19}$	$26 \cdot 10^{20}$	5
6	GaAs	200	$6 \cdot 10^{20}$	$25 \cdot 10^{21}$	6
7	Si	210	$7 \cdot 10^{19}$	$24 \cdot 10^{20}$	7
8	Ge	220	$8 \cdot 10^{20}$	$23 \cdot 10^{21}$	8
9	GaAs	230	$9 \cdot 10^{19}$	$22 \cdot 10^{20}$	9
10	Si	240	$10 \cdot 10^{20}$	$21 \cdot 10^{21}$	10
11	Ge	250	$11 \cdot 10^{21}$	$20 \cdot 10^{20}$	1
12	GaAs	260	$12 \cdot 10^{20}$	$19 \cdot 10^{21}$	2
13	Si	270	$13 \cdot 10^{21}$	$18 \cdot 10^{20}$	3
14	Ge	280	$14 \cdot 10^{20}$	$17 \cdot 10^{21}$	4
15	GaAs	290	$15 \cdot 10^{21}$	$16 \cdot 10^{20}$	5
16	Si	300	$16 \cdot 10^{20}$	$15 \cdot 10^{21}$	6
17	Ge	310	$17 \cdot 10^{21}$	$14 \cdot 10^{20}$	7
18	GaAs	320	$18 \cdot 10^{20}$	$13 \cdot 10^{21}$	8
19	Si	330	$19 \cdot 10^{21}$	$12 \cdot 10^{20}$	9
20	Ge	340	$20 \cdot 10^{20}$	$11 \cdot 10^{21}$	10
21	GaAs	350	$21 \cdot 10^{21}$	$10 \cdot 10^{20}$	1
22	Si	360	$22 \cdot 10^{20}$	$9 \cdot 10^{21}$	2
23	Ge	370	$23 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^{19}$	3
24	GaAs	380	$24 \cdot 10^{20}$	$7 \cdot 10^{21}$	4
25	Si	390	$25 \cdot 10^{21}$	$6 \cdot 10^{19}$	5
26	Ge	400	$26 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{21}$	6
27	GaAs	410	$27 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{19}$	7
28	Si	420	$28 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{21}$	8
29	Ge	430	$29 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{19}$	9
30	GaAs	440	$30 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{21}$	10

Таблица 2. Основные параметры полупроводниковых материалов

Материал полупроводника		Si	Ge	GaAs
Ширина запрещенной зоны при $T=0$ К	$\Delta\varepsilon_{g0}$, эВ	1.17	0.744	1.519
Параметры для определения ширины запрещенной зоны	α , эВ/К	$4.73 \cdot 10^{-4}$	$4.774 \cdot 10^{-4}$	$5.405 \cdot 10^{-4}$
	β , К	636	235	204
Параметры для определения подвижности носителей	a_n	2.42	1.66	1.0
	a_p	2.2	2.33	2.1
Подвижности носителей заряда при $T_0=300$ К	μ_{0n} , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0.15	0.39	0.85
	μ_{0p} , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0.06	0.19	0.04
Эффективные массы носителей заряда	$m_n^*/m_{\bar{e}}$	1.08	0.56	0.068
	$m_p^*/m_{\bar{e}}$	0.56	0.35	0.45
Диэлектрическая проницаемость	ε	11.8	16.0	13.2
Время жизни носителей заряда	$\tau_{n,p}$, с	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$

Некоторые физические постоянные

Заряд электрона $q=1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл

Масса электрона $m_{\bar{e}}=9.109 \cdot 10^{-31}$ кг

Постоянная Больцмана $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К= $8.614 \cdot 10^{-5}$ эВ/К

Постоянная Планка $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Диэлектрическая постоянная $\varepsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Зонная структура полупроводников

Образование энергетических зон в твердых телах происходит при сближении отдельных атомов на очень близкое расстояние. В результате взаимодействия близко расположенных атомов, электронные уровни занимают положения с различными энергиями. Вместо одного уровня образуется целый набор энергетических уровней, отличающихся небольшим значением энергии. Этот набор уровней называют энергетической зоной. Энергетические зоны могут перекрываться (например, в металлах), а могут быть разделены запрещенной зоной (например, в полупроводниках и диэлектриках). Расположение энергетических уровней и зон обычно представляют на энергетической диаграмме, на оси абсцисс которой откладывается пространственная координата, а по оси ординат энергия электронов. Энергетическая диаграмма собственного полупроводника (то есть полупроводника без каких-либо примесей) представлена на рисунке 1. Самая верхняя зона, занятая валентными электронами, называется валентной зоной. Следующая за ней разрешенная зона называется зоной проводимости, поскольку электроны, находящиеся в этой зоне, обуславливают электрическую проводимость полупроводника. Самый верхний энергетический уровень в валентной зоне называется потолком валентной зоны ε_v , а самый нижний уровень зоны проводимости – дном зоны проводимости ε_c . В полупроводниках при температуре абсолютного нуля все уровни валентной зоны заняты электронами, а в зоне проводимости находятся полностью свободные уровни.

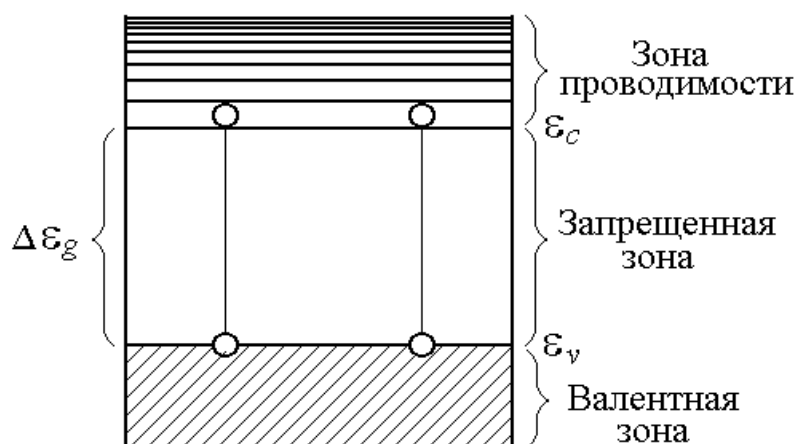


Рисунок 1. Структура энергетических зон для собственного полупроводника

При температуре выше абсолютного нуля тепловое возбуждение приводит к перебросу части электронов из валентной зоны через запрещенную

зону на дно зоны проводимости. По этой причине отсутствие электрона в валентной зоне приводит к появлению положительного заряда в химической ковалентной связи, который характеризуется как положительно заряженная квазичастица – дырка. Следовательно, носителями зарядов в полупроводниках являются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Движение дырок можно представить как совокупное перемещение электронов валентной зоны.

Процесс образования свободных электронов и дырок под воздействием тепла называют тепловой генерацией. Она характеризуется скоростью генерации G , определяющей количество пар носителей заряда, генерируемых в единицу времени. Помимо тепловой генерации возможна генерация под воздействием света или каких-либо других энергетических воздействий. Возникшие в результате генерации носители заряда находятся в состоянии хаотического движения. Двигаясь хаотически, электроны могут занимать вакантные места в ковалентных связях. Это явление называют рекомбинацией и характеризуют скоростью рекомбинации R , определяющей количество пар носителей заряда, исчезающих в единицу времени.

В равновесном состоянии генерация и рекомбинация протекают с одинаковой скоростью ($R=G$), поэтому в беспримесном полупроводнике устанавливается собственная концентрация электронов, обозначаемая n_i , и собственная концентрация дырок, обозначаемая p_i . Индекс i происходит от англ. intrinsic – собственный. Поскольку электроны и дырки генерируются попарно, то в собственном полупроводнике выполняется условие $n_i = p_i$. Скорость тепловой генерации обратно пропорциональна ширине запрещенной зоны $\Delta\epsilon_g$ и прямо пропорциональна температуре T . Поэтому чем шире запрещенная зона, тем меньше концентрация собственных носителей заряда.

Энергетический уровень, вероятность нахождения электронов на котором равна $1/2$, называется уровнем Ферми (ϵ_F). В собственных полупроводниках уровень Ферми располагается вблизи середины запрещенной зоны (ϵ_i).

Ширина запрещенной зоны в полупроводниках хоть и слабо, но меняется с изменением температуры. Это происходит по двум причинам: из-за изменения амплитуды тепловых колебаний атомов решетки, которое ведет к уменьшению $\Delta\epsilon_g$ с ростом температуры; из-за изменения межатомных расстояний, т.е. объема тела, благодаря чему $\Delta\epsilon_g$ может как уменьшаться, так и увеличиваться. Как показывают экспериментальные результаты, ширина запрещенной зоны большинства полупроводников уменьшается с ростом тем-

пературы. Температурные зависимости для наиболее распространенных полупроводников Ge, Si и GaAs приведены на рисунке 2.

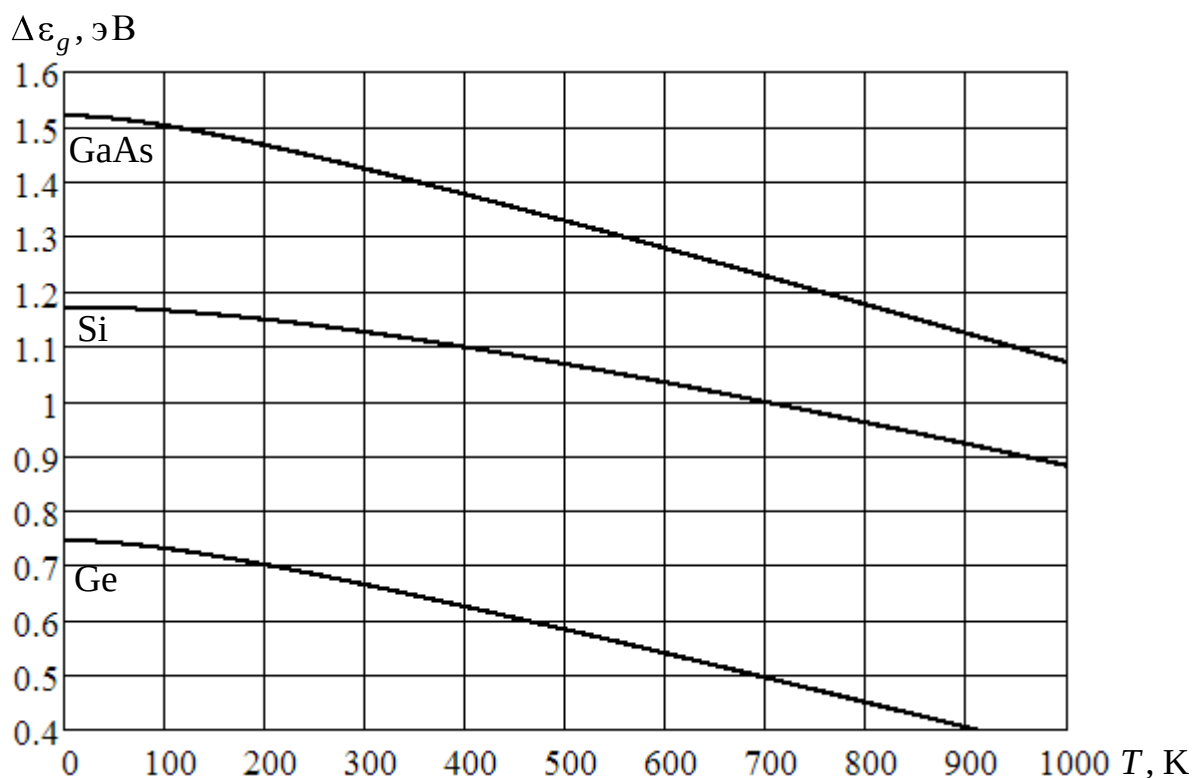


Рисунок 2. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны.

Зависимость $\Delta\epsilon_g = f(T)$ в этих полупроводниках может быть аппроксимирована универсальной функцией, используя которую можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника при любой температуре

$$\Delta\epsilon_g = \Delta\epsilon_{g0} - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}. \quad (1)$$

Числовые значения параметров $\Delta\epsilon_{g0}$, α и β определяются по экспериментальным зависимостям и приведены в таблице 2.

Концентрация подвижных носителей заряда в собственном полупроводнике

В единичном объеме конкретного полупроводника при данной температуре находится определенное количество свободных носителей (электронов и дырок), которое называется концентрацией. Для нахождения концентрации носителей необходимо учесть число имеющихся в разрешенной зоне

(зона проводимости для электронов и валентная зона для дырок) свободных энергетических уровней $N(\varepsilon)$, принимая во внимание принцип запрета Паули.

В теории твердого тела показано, что плотность энергетических уровней N (плотность состояний), приходящихся на единичный интервал энергии, зависит от энергии (рис. 3, а):

$$N_c(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3} 2m_n^{*3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_c}, \quad (2)$$

$$N_v(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3} 2m_p^{*3/2} \sqrt{\varepsilon_v - \varepsilon}. \quad (3)$$

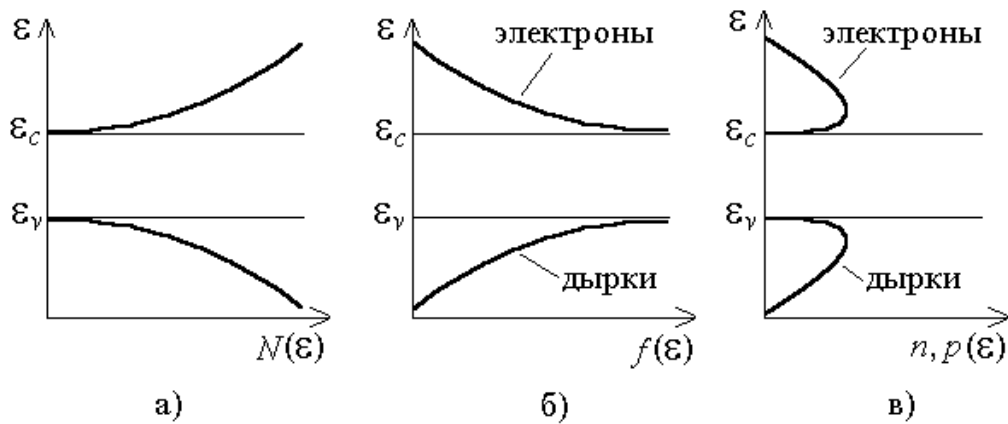


Рисунок 3. Зависимости плотности энергетических состояний (а), вероятностей заполнения уровней свободными носителями (б) и концентраций свободных носителей (в) от энергии в беспримесном полупроводнике

В системах частиц, описываемых антисимметричными волновыми функциями, осуществляется распределение Ферми-Дирака. Этой статистикой описывается поведение систем фермионов (электронов, протонов, нейтронов) – частиц, подчиняющихся принципу Паули и имеющих полуцелый спин ($\pm 1/2$). Вероятность заполнения разрешенных уровней определяется функцией Ферми-Дирака (рис. 3, б), содержащей в качестве параметров состояния температуру и энергию уровня Ферми:

$$f_n(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$f_p(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Если число электронов (или дырок), приходящихся на любой энергетический интервал, меньше числа возможных состояний, то такой полупровод-

ник называется невырожденным. Невырожденными полупроводниками являются нелегированные (беспримесные) и слабо легированные полупроводники. Полупроводники становятся вырожденными при высоких концентрациях примесей, когда число подвижных носителей превышает число возможных состояний. В невырожденных полупроводниках электроны и дырки имеют энергию, значительно отличающуюся от энергии Ферми. Разность $\varepsilon - \varepsilon_F$, как правило, более чем в три раза превышает значение kT . Поэтому единицей в знаменателях формул (4) и (5) можно пренебречь. Тогда вероятность заполнения энергетических уровней в зоне проводимости будет распределением Максвелла-Больцмана классической статистики:

$$f_n(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad (6)$$

а вероятность возникновения дырки будет равна:

$$f_p(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon}{kT}\right). \quad (7)$$

Энергетическая плотность электронов и дырок равна:

$$n(\varepsilon) = N_c(\varepsilon) f_n(\varepsilon), \quad (8)$$

$$p(\varepsilon) = N_v(\varepsilon) f_p(\varepsilon). \quad (9)$$

Для определения концентрации электронов и дырок в полупроводнике надо проинтегрировать по энергии энергетическую плотность электронов и дырок соответственно

$$n = \int_{\varepsilon_c}^{\infty} N_c(\varepsilon) f_n(\varepsilon) d\varepsilon = N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad (10)$$

$$p = \int_0^{\varepsilon_v} N_v(\varepsilon) f_p(\varepsilon) d\varepsilon = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right). \quad (11)$$

Здесь N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, а N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad (12)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$, следовательно

$$N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_v}{kT}\right). \quad (14)$$

Логарифмируя и решая относительно ε_F , получаем

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}. \quad (15)$$

Величина $\frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$ значительно меньше, чем $\frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2}$, поэтому уровень Ферми в собственном полупроводнике расположен приблизительно посередине запрещенной зоны.

Концентрация носителей заряда в примесных полупроводниках

Концентрация равновесных носителей заряда зависит от положения уровня Ферми. В электронном полупроводнике концентрация электронов в основном обусловлена переходом электронов с энергетических уровней доноров (ε_d) на энергетические уровни зоны проводимости. Поэтому концентрация n_n должна быть равна концентрации ионизированных доноров:

$$n_n = N_d (1 - f(\varepsilon_d)). \quad (16)$$

$1 - f(\varepsilon_d)$ – вероятность отсутствия электрона на уровне ε_d , следовательно

$$n_n = N_d \exp \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_F}{kT}. \quad (17)$$

Приравнявая правые части уравнений (10) и (17) получаем:

$$N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_F}{kT}\right) = N_d \exp \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_F}{kT}. \quad (18)$$

Решая это равенство относительно ε_F получаем выражение

$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_c}{2} - \frac{kT}{2} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (19)$$

Из полученного выражения следует, что положение уровня Ферми зависит от температуры и концентрации примеси. Можно показать, что

$$n_n = n_i \exp \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_i}{kT}, \quad (20)$$

$$p_n = n_i \exp \left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_i}{kT}\right). \quad (21)$$

Умножая полученные соотношения друг на друга получим

$$n_n p_n = n_i^2. \quad (22)$$

Таким образом, при любой концентрации примесей произведение концентраций электронов и дырок остается постоянной величиной.

В дырочном полупроводнике концентрация дырок в основном обусловлена переходом электронов с энергетических уровней валентной зоны на энергетический уровень акцепторов. Поэтому концентрация дырок должна быть равна концентрации ионизированных примесей, то есть

$$p_p = N_a \exp\left(-\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_F}{kT}\right) = n_i \exp\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_F}{kT}, \quad (23)$$

$$n_p = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_F}{kT}\right). \quad (24)$$

Электропроводность полупроводников

Направленное движение носителей заряда в приложенном электрическом поле представляет собой электрический ток, также называемый дрейфовым током. Учитывая то, что перемещаются как электроны, так и дырки, плотность дрейфового тока можно представить в виде:

$$j_{др} = j_{др.n} + j_{др.p} = qn\mu_n E + qp\mu_p E = \sigma E, \quad (25)$$

где $\sigma = qn\mu_n + p\mu_p$ – удельная электропроводность полупроводника, μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно, q – заряд электрона, E – напряженность электрического поля.

Для полупроводника n -типа главную роль играет электронная электропроводность, а для полупроводника p -типа главную роль играет дырочная проводимость, поэтому в примесных полупроводниках, как правило, одним из слагаемых можно пренебречь.

Помимо дрейфа подвижных носителей вклад в электрический ток может вносить диффузионное движение носителей. Как известно, диффузия представляет собой направленное перемещение носителей вследствие их неодинаковой концентрации в различных частях кристалла. Плотность тока будет пропорциональна градиенту концентрации подвижных носителей (dn/dx или dp/dx); соответственно плотность диффузионного тока для электронов может быть представлена как:

$$j_{диф.n}(x) = qD_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad (26)$$

а плотность диффузионного тока дырок вследствие изменения знака заряда носителей запишется как:

$$j_{\text{диф.}p}(x) = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}, \quad (27)$$

где D_n и D_p – коэффициенты диффузии соответственно для электронов и дырок.

Коэффициенты диффузии, подобно подвижностям μ , характеризующим дрейфовое движение, отражают способность электронов и дырок к перемещению. Связь между коэффициентами диффузии и подвижностями определяется соотношением Эйнштейна:

$$D_n = kT\mu_n/q; D_p = kT\mu_p/q. \quad (28)$$

Таким образом, суммарный электрический ток состоит из четырех составляющих дрейфового электронного и дырочного и диффузионного электронного и дырочного:

$$\begin{aligned} j &= j_{\text{др.}n} + j_{\text{др.}p} + j_{\text{диф.}n} + j_{\text{диф.}p} = \\ &= qn\mu_n E + qp\mu_p E + qD_n \frac{dn}{dx} + qD_p \frac{dp}{dx}. \end{aligned} \quad (29)$$

Подвижности электронов и дырок в реальных полупроводниках, вследствие процессов рассеяния, ниже подвижностей в кристаллах с идеальной решеткой. В полупроводниках рассеяние носителей заряда происходит в основном на акустических фононах (колебаниях узлов кристаллической решетки) и на ионах примесей. В разных температурных диапазонах будет доминировать тот или иной механизм рассеяния, и он будет определять величину и температурную зависимость подвижности носителей заряда. При низких температурах ($T < 100$ К) характер зависимости подвижности обусловлен рассеянием на ионах примесей. В этом температурном диапазоне подвижность увеличивается с ростом температуры. В области высоких температур ($T > 100$ К) подвижность уменьшается с ростом температуры вследствие рассеяния на акустических фононах и зависимость подвижности носителей заряда от температуры можно представить полуэмпирической моделью

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-a}, \quad (30)$$

где μ_0 – подвижность носителей заряда при $T_0 = 300$ К, a – параметр, определяемый опытным путем. Значения μ_0 и параметра a для различных полупроводников представлены в таблице 2.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.

Определить концентрацию носителей заряда в собственном германии при температуре 350 К. Данные необходимые для расчета взять из таблицы 2.

Решение.

Полупроводник называется собственным или типа *i* (intrinsic), если в нем отсутствуют какие-либо примеси. В этом случае свободные электроны и дырки образуются попарно только за счет тепловой генерации и рекомбинируют также попарно. Следовательно, в собственном полупроводнике концентрация свободных электронов равна концентрации дырок. Поскольку ширина запрещенной зоны полупроводника зависит от температуры, определим ее, используя зависимость (1):

$$\Delta\varepsilon_g = \Delta\varepsilon_{g0} - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}.$$

Параметры германия возьмем из таблицы 2: ширина запрещенной зоны при температуре абсолютного нуля $\Delta\varepsilon_{g0} = 0.744$ эВ, параметры $\alpha = 4.774 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, $\beta = 235$ К. Для температуры 350 К ширина запрещенной зоны равна:

$$\Delta\varepsilon_g = \Delta\varepsilon_{g0} - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} = 0.744 - \frac{4.774 \cdot 10^{-4} \cdot 350^2}{350 + 235} = 0.644 \text{ эВ}.$$

Концентрация собственных носителей заряда определяется по формулам (10) и (11):

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad p_i = N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right).$$

Согласно закону «действующих масс» $n_i p_i = n_i^2$, следовательно, перемножив (10) на (11), получим:

$$\begin{aligned} n_i^2 &= N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right) \cdot N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_V}{kT}\right) = \\ &= N_C N_V \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_g}{kT}\right), \end{aligned}$$

откуда

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_g}{2kT}\right).$$

Определим эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне по формулам (12) и (13):

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.56 \cdot 9.109 \cdot 10^{-31} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}{(6.62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 1.328 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.35 \cdot 9.109 \cdot 10^{-31} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}{(6.62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 6.561 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Зная эффективные плотности состояний можно определить собственную концентрацию носителей заряда в полупроводнике:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left(-\frac{\Delta \epsilon_g}{2kT} \right) = \sqrt{1.328 \cdot 10^{25} \cdot 6.561 \cdot 10^{24}} \exp -\frac{0.644}{2 \cdot 8.614 \cdot 10^{-5} \cdot 350} = 2.146 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 2.

Определить удельное электрическое сопротивление и отношение полного тока, протекающего через полупроводник к току, обусловленного электронной составляющей в собственном кремнии с концентрацией носителей заряда $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и подвижностями электронов и дырок $\mu_n = 0.15 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0.06 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно.

Решение.

Удельное электрическое сопротивление обратно пропорционально удельной электрической проводимости, которая, согласно (25) равна:

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p = qn_i(\mu_n + \mu_p) = 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{19} \cdot (0.15 + 0.06) = 0.336 \text{ См/м},$$

поскольку в собственном полупроводнике $n = p = n_i$.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0.336} = 2.972 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Полный ток через полупроводник равен сумме дырочной и электронной составляющих дрейфового и диффузионного токов (29). Так как инжекция и экстракция носителей заряда отсутствуют, то полупроводник находится в равновесном состоянии и диффузионная составляющая тока отсутствует (градиент концентрации носителей заряда равен нулю). Следовательно, полный ток равен дрейфовому току, который, в свою очередь, состоит из дырочной и электронной составляющих:

$$j = j_{dp} = j_{dp,n} + j_{dp,p} = qn\mu_n E + qp\mu_p E,$$

где E – напряженность приложенного электрического поля. Отношение полного тока к электронной составляющей будет равно:

$$\beta = \frac{j}{j_n} = \frac{qn\mu_n E + qp\mu_p E}{qn\mu_n E} = \frac{\mu_n + \mu_p}{\mu_n} = 1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} = 1 + \frac{0.06}{0.15} = 1.4$$

Задача 3.

Сравнить положение уровня Ферми для собственного арсенида галлия с эффективной плотностью состояний $N_C = 4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_V = 6 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и GaAs n -типа с концентрацией электронов $n_n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и дырок $p_n = 10^{14} \text{ м}^{-3}$ при $T = 250 \text{ К}$.

Решение.

Определим положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике, согласно (10) и (11) равны

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad p_i = N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right).$$

Поскольку в собственном полупроводнике концентрация электронов равна концентрации дырок, приравняем эти выражения и выразим уровень Ферми:

$$\begin{aligned} N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right) &= N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right); \\ \frac{N_C}{N_V} &= \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right)} = \exp\left(-\frac{2\varepsilon_F - \varepsilon_V - \varepsilon_C}{kT}\right); \\ 2\varepsilon_F - \varepsilon_V - \varepsilon_C &= -kT \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right); \\ \varepsilon_F &= \frac{\varepsilon_V + \varepsilon_C}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = \varepsilon_i - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right). \end{aligned}$$

Найдем положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны. Поскольку энергия уровней измеряется в электрон-вольтах (эВ), возьмем постоянную Больцмана $k = 8.614 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$, получим:

$$\varepsilon_F - \varepsilon_i = -\frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = -\frac{8.614 \cdot 10^{-5} \cdot 250}{2} \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{23}}{6 \cdot 10^{24}}\right) = 0.029 \text{ эВ}.$$

Следовательно, уровень Ферми в собственном полупроводнике лежит выше середины запрещенной зоны на 0.029 эВ. В полупроводнике n -типа концентрации электронов и дырок, согласно (20) и (21), равны

$$n_n = n_i \exp\left(\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right), \quad p_n = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right).$$

Возьмем отношение концентраций и выразим уровень Ферми:

$$\frac{n_n}{p_n} = \frac{\exp\left(\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right)} = \exp\left(\frac{2\varepsilon_{Fn} - 2\varepsilon_i}{kT}\right);$$

$$2\varepsilon_{Fn} - 2\varepsilon_i = kT \ln\left(\frac{n_n}{p_n}\right);$$

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n_n}{p_n}\right).$$

Найдем положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны:

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n_n}{p_n}\right) = \frac{8.614 \cdot 10^{-5} \cdot 250}{2} \ln\left(\frac{10^{20}}{10^{14}}\right) = 0.149 \text{ эВ}.$$

Следовательно, уровень Ферми в полупроводнике n -типа лежит на 0.149 эВ выше середины запрещенной зоны. Найдем разность между уровнями Ферми в полупроводнике n -типа и собственном полупроводнике

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_F = 0.149 - 0.029 = 0.12 \text{ эВ}.$$

В полупроводнике n -типа уровень Ферми расположен на 0.12 эВ выше уровня Ферми собственного полупроводника.

Задача 4.

Определить концентрацию свободных электронов и дырок в полупроводнике p -типа, если собственная концентрация носителей равна $n_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, концентрация акцепторных примесей $N_a = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Решение.

При достаточно низких температурах в примесных полупроводниках преобладает механизм образования свободных носителей заряда, основанный на ионизации примесных атомов.

Если полупроводник легирован акцепторными примесями, то в первую очередь происходит переход электронов из валентной зоны на акцепторный уровень с образованием дырок в валентной зоне. Образовавшиеся дырки яв-

ляются основными носителями заряда, поскольку их концентрация превышает концентрацию свободных электронов в зоне проводимости. При некоторой температуре все акцепторы становятся ионизированными и концентрация дырок в валентной зоне примерно равна концентрации акцепторных примесей

$$p_p \approx N_a = 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Такое допущение справедливо, когда генерация носителей заряда по механизму ионизации примесных атомов намного больше тепловой генерации носителей заряда, то есть, когда $n_i \ll N_a$. Остальные случаи будут рассмотрены ниже. Из закона «действующих масс» найдем концентрацию электронов, которые для акцепторного полупроводника являются неосновными носителями заряда

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{(10^{18})^2}{10^{20}} = 10^{16} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 5.

Определить концентрацию свободных электронов и дырок в полупроводнике n -типа, если собственная концентрация носителей равна $n_i = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, концентрация донорных примесей $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Решение.

При высоких температурах в примесных полупроводниках действуют два механизма образования свободных носителей заряда: основанный на ионизации примесных атомов и тепловая генерация носителей заряда.

При легировании полупроводника донорными примесями вначале происходит ионизация этих примесей, то есть электроны с донорного уровня переходят в зону проводимости, в результате чего образуется большое число свободных электронов. После полной ионизации примесей все большую роль начинает играть и тепловая генерация носителей заряда с образованием электронно-дырочных пар. В общем случае в полупроводнике должно выполняться условие электронейтральности, когда положительный заряд ионизированных доноров и дырок скомпенсирован отрицательным зарядом свободных электронов:

$$n_n = N_d + p_n.$$

Из закона «действующих масс» выразим концентрацию электронов и подставим в предыдущее выражение

$$n_n = \frac{n_i^2}{p_n}, \quad \frac{n_i^2}{p_n} = N_d + p_n.$$

Составим квадратное уравнение относительно p_n :

$$p_n^2 + N_d p_n - n_i^2 = 0.$$

Найдем корни уравнения:

$$D = N_d^2 + 4n_i^2,$$

$$p_n = \frac{-N_d - \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2}.$$

Данный корень не подходит, поскольку концентрация оказывается отрицательной величиной. Следовательно, концентрация неосновных носителей заряда (дырок в полупроводнике n -типа) будет равна:

$$\begin{aligned} p_n &= \frac{-N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2} = \frac{-10^{20} + \sqrt{(10^{20})^2 + 4 \cdot (5 \cdot 10^{19})^2}}{2} = \\ &= \frac{-10^{20} + 1.414 \cdot 10^{20}}{2} = 2.071 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}. \end{aligned}$$

Найдем концентрацию электронов:

$$n_n = N_d + p_n = 10^{20} + 2.071 \cdot 10^{19} = 1.207 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Таким способом рационально находить концентрации носителей заряда при условии, что собственная концентрация по порядку близка к концентрации легирующей примеси, то есть, когда $n_i \approx N_d$.

Если собственная концентрация носителей много больше концентрации легирующих примесей, то есть когда $n_i \gg N_d$, то преобладает механизм тепловой генерации и концентрация основных и неосновных носителей заряда примерно равна собственной концентрации.

Задача 6.

Определить контактную разность потенциалов p - n -перехода при комнатной температуре и ширину области пространственного заряда, если переход изготовлен из кремния со следующими параметрами $n_n = 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $p_n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, $p_p = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $n_p = 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Построить энергетическую диаграмму p - n -перехода.

Решение.

Контактная разность потенциалов определяется как разность уровней Ферми в полупроводниках с различным типом проводимости.

$$\varphi_{\kappa} = \frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp}}{q}.$$

Воспользуемся выражением для нахождения уровня Ферми из задачи 3. Комнатную температуру возьмем равной $T=300$ К

$$\varepsilon_{Fn} = \varepsilon_i + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n_n}{p_n}\right) = \varepsilon_i + \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \ln\left(\frac{10^{19}}{10^{17}}\right) = \varepsilon_i + 9.533 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = \varepsilon_i + 0.06 \text{ эВ}$$

$$\varepsilon_{Fp} = \varepsilon_i + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n_p}{p_p}\right) = \varepsilon_i + \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \ln\left(\frac{10^{16}}{10^{20}}\right) = \varepsilon_i + 1.906 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \varepsilon_i - 0.12 \text{ эВ}$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\kappa} &= \frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp}}{q} = \frac{kT}{2q} \ln\left(\frac{n_n}{p_n}\right) - \frac{kT}{2q} \ln\left(\frac{n_p}{p_p}\right) = \frac{kT}{2q} \ln\left(\frac{n_n p_p}{p_n n_p}\right) = \\ &= \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{10^{19} \cdot 10^{20}}{10^{17} \cdot 10^{16}}\right) = 0.18 \text{ В} \end{aligned}$$

Область пространственного заряда (ОПЗ) образуется за счет ухода основных носителей заряда через переход во время диффузии. В результате в каждом из полупроводников вблизи перехода образуется область обедненная носителями заряда. Ширина обедненной области определяется выражением:

$$W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{\kappa} - U)}{qN_a^2\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}}, \quad W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{\kappa} - U)}{qN_d^2\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника (для Si $\varepsilon=11.8$), U – напряжение, приложенное к p - n -переходу.

При комнатной температуре все примесные атомы ионизированы, поэтому концентрации основных носителей заряда примерно равны концентрациям донорных и акцепторных примесей. В отсутствие внешнего напряжения ширины обедненных областей будут равны

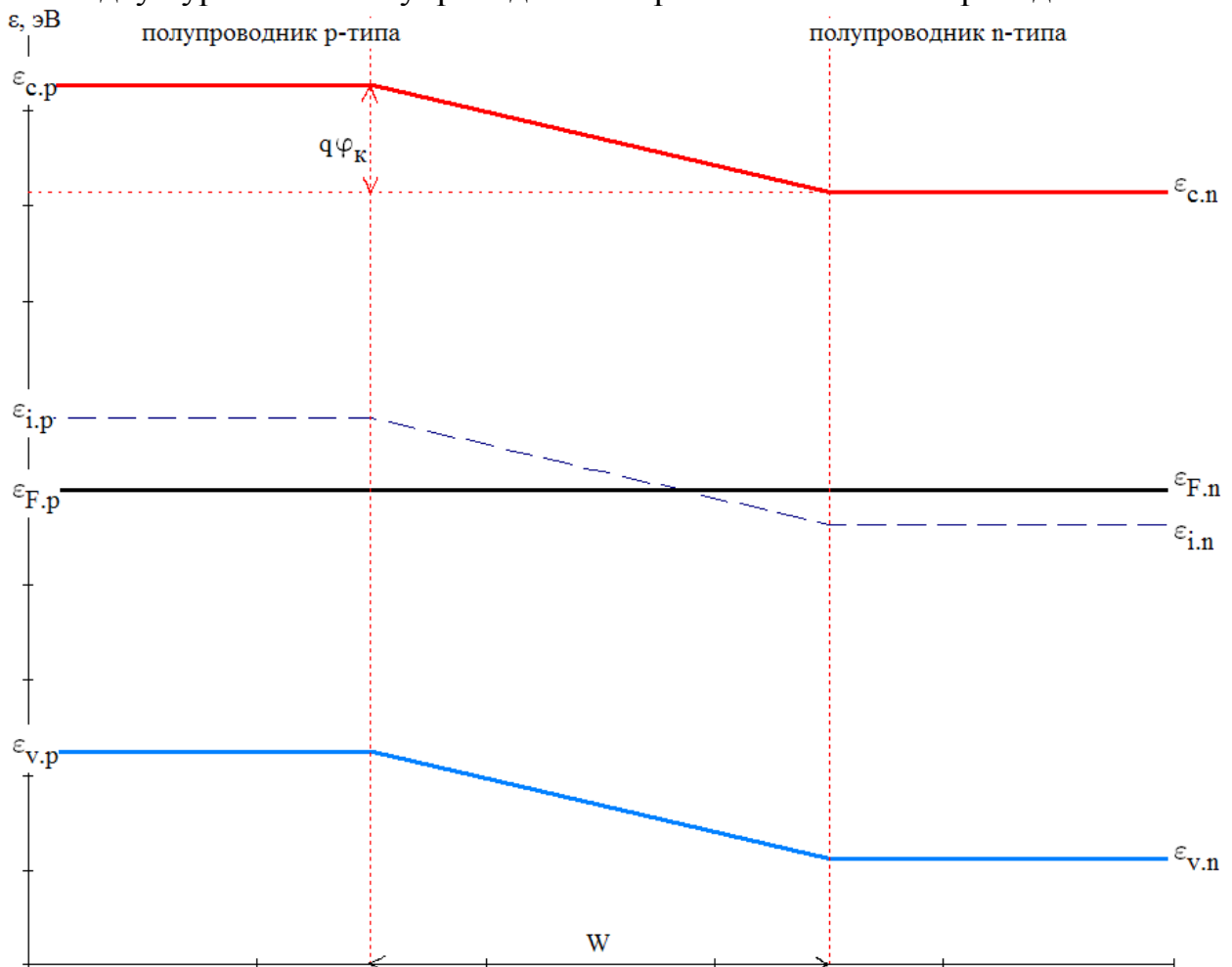
$$W_p \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{\kappa}}{qp_p^2\left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{n_n}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11.8 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 0.179}{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{40} \cdot \frac{1}{10^{20}} + \frac{1}{10^{19}}}} = 4.607 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

$$W_n \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{\kappa}}{qn_n^2\left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{n_n}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11.8 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 0.179}{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{38} \cdot \frac{1}{10^{20}} + \frac{1}{10^{19}}}} = 4.607 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ширина ОПЗ равна сумме обедненных областей

$$W = W_p + W_n = 0.461 \cdot 10^{-6} + 4.607 \cdot 10^{-6} = 5.068 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Построим энергетическую диаграмму p - n -перехода. Для этого сначала отложим уровень Ферми. Он будет идти строго горизонтально, поскольку в равновесном состоянии энергия Ферми в p - и n -полупроводнике выравнивается ($\varepsilon_{Fp} = \varepsilon_{Fn}$). Отметим среднюю часть по оси абсцисс в качестве ОПЗ (W). Далее отложим энергию середины запрещенной зоны (ε_{ip} и ε_{in}). В p -полупроводнике (слева от ОПЗ) она расположена на 0.12 эВ выше уровня Ферми, а в n -полупроводнике (справа от ОПЗ) – ниже уровня Ферми на 0.06 эВ. В ОПЗ соединим середины запрещенных зон ε_i между собой прямой линией. Тангенс угла наклона этой линии пропорционален контактной разности потенциалов. После этого можно отметить дно зоны проводимости (ε_c) в обоих полупроводниках, лежащее выше середины запрещенной зоны на половину ширины запрещенной зоны ($\Delta\varepsilon_g/2 = 0.56$ эВ), и потолок валентной зоны (ε_v), лежащий ниже середины запрещенной зоны также на половину ее величины (0.56 эВ). Отметим контактную разность потенциалов, как разность двух уровней в полупроводниках с различным типом проводимости.



Задача 7.

Определить величину заряда на единицу площади и построить распределение напряженности внутреннего электрического поля в ОПЗ несимметричного p - n -перехода изготовленного из германия. Известно, что $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_a = 4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $W = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Решение.

Величины заряда на единицу площади по обе стороны перехода равны

$$Q_p = qN_a W_p, \quad Q_n = qN_d W_n.$$

В силу условия электронейтральности, положительные заряды в n -области, образованные ионизированными донорами, должны быть скомпенсированы отрицательными зарядами в p -области, образованные ионизированными акцепторами

$$Q_p = Q_n \Rightarrow qN_a W_p = qN_d W_n \Rightarrow W_p = W_n \frac{N_d}{N_a}.$$

Подставим ширину обедненной p -области в выражение для ширины ОПЗ, получим

$$\begin{aligned} W &= W_n + W_p = W_n + W_n \frac{N_d}{N_a} = W_n \frac{N_a + N_d}{N_a} \Rightarrow \\ W_n &= W \frac{N_a}{N_a + N_d} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 10^{20}}{4 \cdot 10^{20} + 10^{20}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \end{aligned}$$

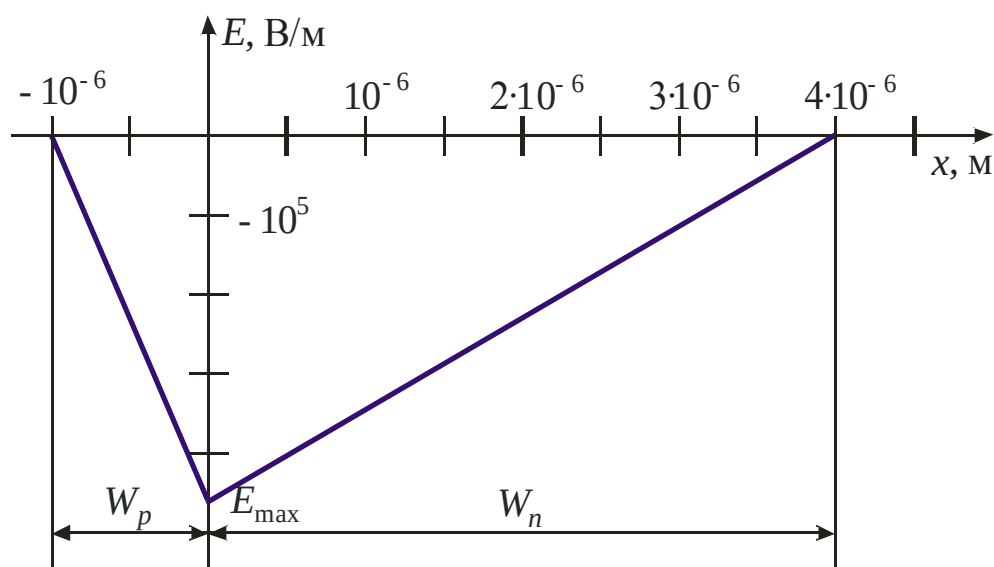
Тогда величина заряда на единицу площади будет равна

$$Q_n = qN_d W_n = 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 6.408 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Величина напряженности внутреннего электрического поля максимальна в области перехода (металлургической границы) и линейно убывает по ОПЗ, спадая до нуля на границах ОПЗ. Максимальное значение напряженности электрического поля определяется выражением

$$E_{\max} = -\frac{qN_d W_n}{\epsilon \epsilon_0} = -\frac{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 16} = -4.523 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Построим распределение напряженности электрического поля в ОПЗ.



Задача 8.

Построить вольт-фарадную характеристику кремниевого p - n -перехода для обратных напряжений, имеющего следующие параметры: $\phi_k = 0.6$ В, $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_a = 4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $S = 5 \text{ мм}^2$.

Решение.

Область пространственного заряда можно представить как конденсатор, емкость которого зависит от ширины обедненных областей и плотности объемного заряда. Эта емкость называется барьерной. Поскольку ширина ОПЗ зависит от напряжения, то емкость перехода также зависит от приложенного напряжения. При приложении прямого напряжения к переходу над барьерной емкостью преобладает диффузионная емкость, которая возникает вследствие инжекции основных носителей заряда в противоположные области, в результате чего возникают дополнительные (инжектированные) заряды в области перехода. Эта емкость резко возрастает с повышением приложенного напряжения. При приложении обратного напряжения главную роль играет барьерная емкость, так как в этом случае нет диффузии носителей заряда. Рассмотрим влияние внешнего поля на барьерную емкость. В общем случае выражение для емкости записывается в виде

$$C_{бар} = \left| \frac{dQ}{dU} \right|.$$

Воспользуемся выражением для определения заряда из предыдущей задачи

$$Q = SqN_d W_n = SqN_d \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_\kappa - U)}{qN_d^2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}} = S \sqrt{\frac{2q\epsilon\epsilon_0(\varphi_\kappa - U)}{\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}};$$

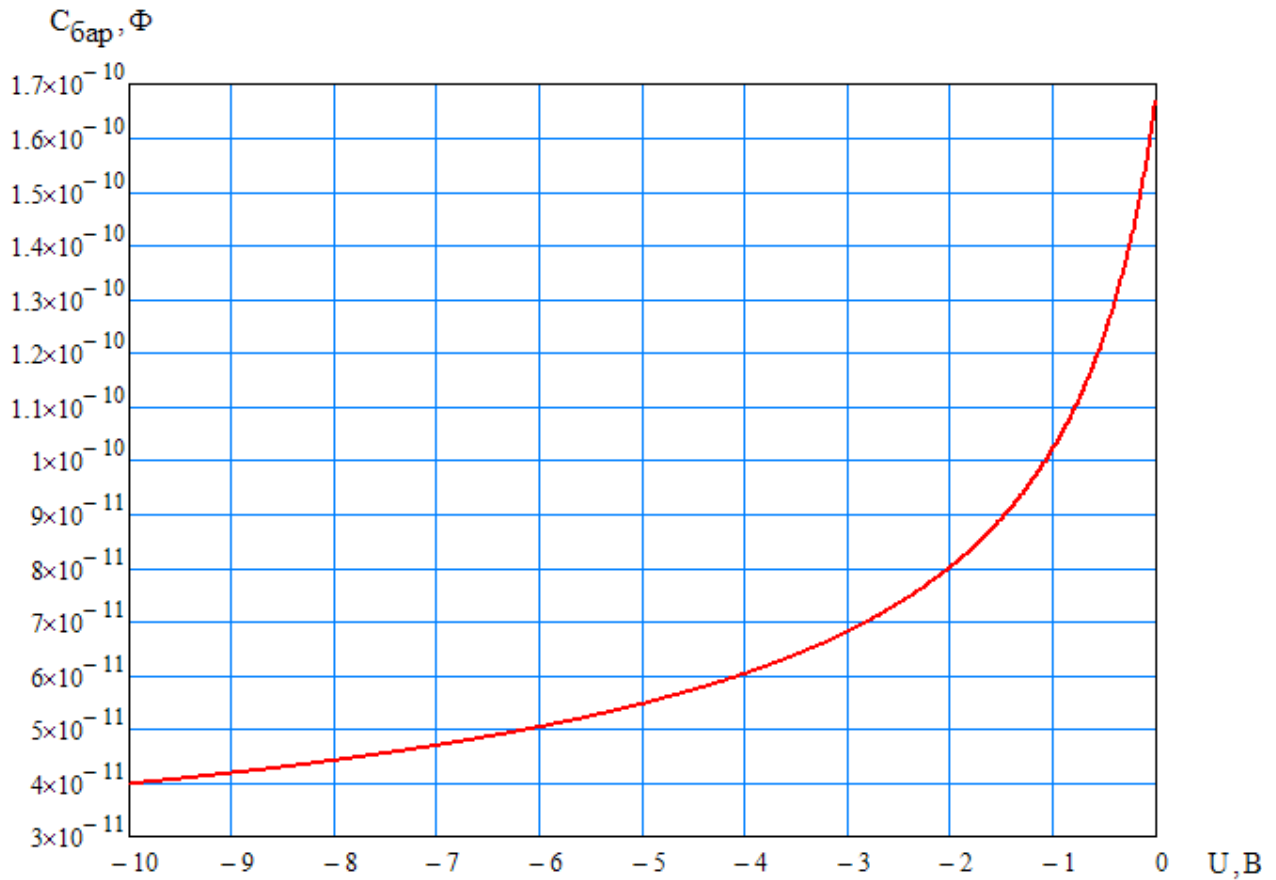
$$\frac{dQ}{dU} = -S \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0}{2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\varphi_\kappa - U)}}.$$

Следовательно

$$C_{бар} = \left| \frac{dQ}{dU} \right| = S \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0}{2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\varphi_\kappa - U)}}.$$

Построим зависимость барьерной емкости от приложенного напряжения. Это и будет вольт-фарадная характеристика p - n -перехода

$$C_{бар}(U) = 5 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 11.8 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}}{2 \frac{1}{4 \cdot 10^{20}} + \frac{1}{10^{20}} (0.6 - U)}} = \sqrt{\frac{1.674 \cdot 10^{-20}}{(0.6 - U)}}.$$



Задача 9.

Построить вольт-амперную характеристику кремниевого p - n -перехода, площадью $S=5 \text{ мм}^2$, при температуре $T=300 \text{ К}$. Концентрации неосновных носителей заряда равны $p_n=10^{15} \text{ м}^{-3}$, $n_p=10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Решение.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода описывается уравнением

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{kT}} - 1,$$

где I_0 – обратный ток диода, или ток насыщения.

В общем случае, ток через переход состоит из дрейфовой и диффузионной составляющих. Диффузионная составляющая плотности тока описывается уравнением вида

$$j_{\text{диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx},$$

где D_p и D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов соответственно. Их можно определить, используя соотношение Эйнштейна

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.602 \cdot 10^{-19}} \cdot 0.06 = 1.55 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.602 \cdot 10^{-19}} \cdot 0.15 = 3.88 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Диффузионная длина носителей связана с коэффициентом диффузии и временем жизни (из табл. 2) соотношением

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{1.55 \cdot 10^{-3} \cdot 2.5 \cdot 10^{-3}} = 1.969 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{3.88 \cdot 10^{-3} \cdot 2.5 \cdot 10^{-3}} = 3.114 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

При приложении обратного напряжения, диффузионный ток становится равным нулю и обратный ток равен дрейфовому току $I_0 = I_{\text{др}}$, который слабо зависит от приложенного напряжения. Дрейфовый ток обусловлен неосновными носителями заряда. Под действием электрического поля неосновные носители уходят через переход со скоростью дрейфа

$$V_{\text{др}} = \frac{L}{\tau} = \frac{LD}{L^2} = \frac{D}{L}.$$

Поскольку плотность дрейфового тока равна

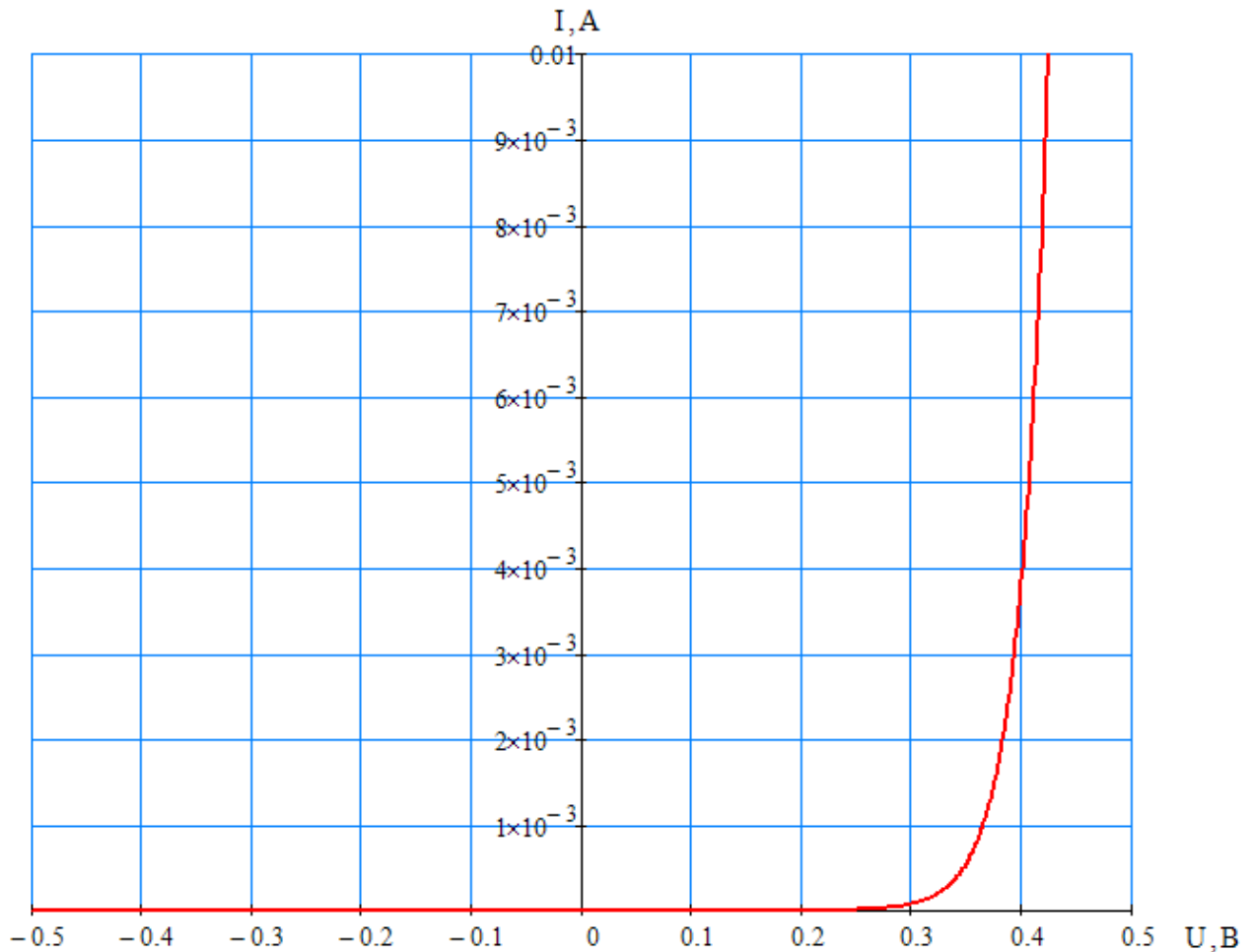
$$j_{\partial p} = j_{\partial p.p} + j_{\partial p.n} = q(p_n V_{\partial p.p} + n_p V_{\partial p.p}) = q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right),$$

а ток связан с плотностью тока соотношением $I = S j$, то

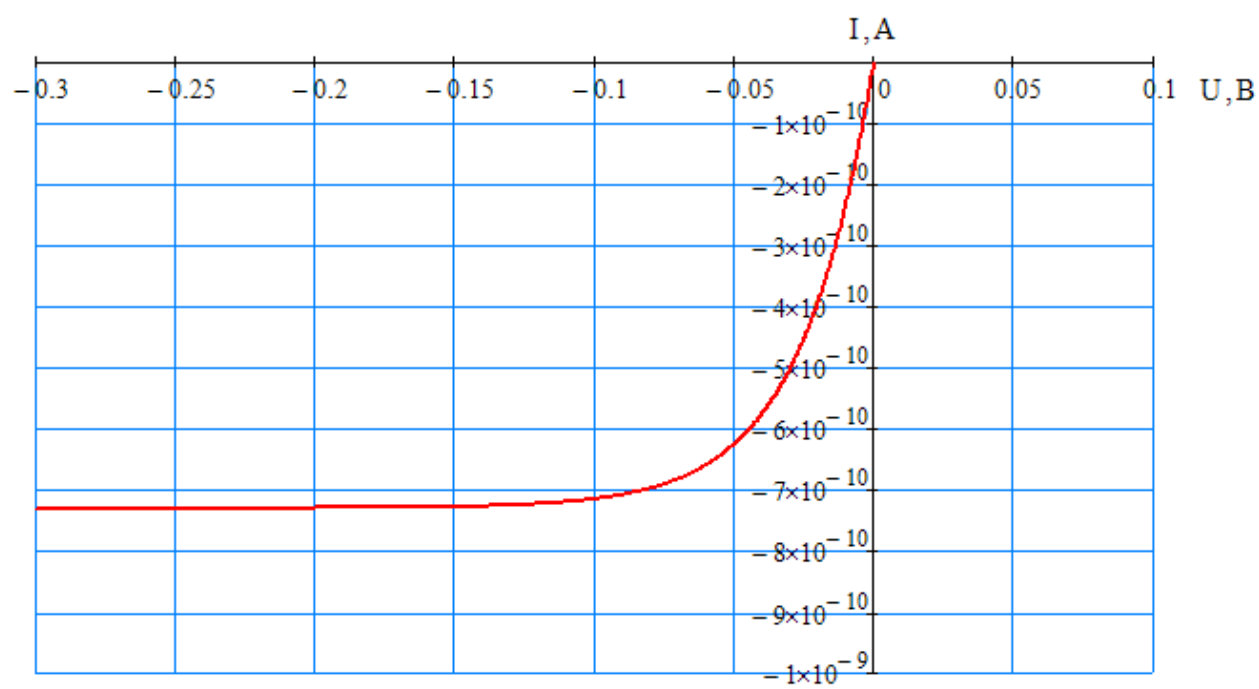
$$I_0 = S q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot \left(\frac{1.55 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{15}}{1.969 \cdot 10^{-3}} + \frac{3.88 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{14}}{3.114 \cdot 10^{-3}} \right) = 7.3 \cdot 10^{-10} \text{ A}.$$

Построим зависимость тока от приложенного напряжения.

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{kT} - 1} = 7.3 \cdot 10^{-10} \cdot e^{\frac{U}{0.0258} - 1}.$$



Видно, что вольт-амперная характеристика р-п-перехода имеет ярко выраженный несимметричный характер. В области прямых напряжений ток р-п-перехода экспоненциально возрастает с ростом приложенного напряжения. В области отрицательных напряжений ток практически равен нулю. Построим обратную ветвь вольт-амперной характеристики в увеличенном масштабе.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Образец оформления титульного листа

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра промышленной электроники

Контрольная работа №1
по курсу «Материалы и элементы электронной техники»

Выполнил студент _____

ФИО

Подпись

Группа _____

Вариант _____

Дата сдачи _____

Адрес студента _____

Проверил преподаватель _____ Потапов А.А. _____

ФИО

Подпись

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Общие рекомендации по работе над дисциплиной «Материалы и элементы электронной техники»	5
Программа дисциплины	7
Методические указания к изучению дисциплины «Материалы и элементы электронной техники»	10
Контрольное задание	14
Теоретические сведения о полупроводниках.....	17
Примеры решения задач.....	25
Приложение	39

Учебное издание

Потапов Андрей Александрович

МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Программа, методические указания
и контрольная работа

Кафедра промышленной электроники КГЭУ

Редактор издательского отдела *О.В. Ханжина*
Компьютерная верстка *О.В. Ханжина*

Подписано в печать ____.

Формат 60×84/16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. ____ Уч.-изд. л. ____ Тираж 500 экз. Заказ № ____.

Издательство КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51
Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51