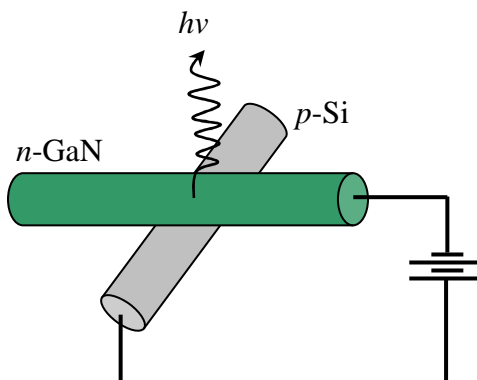


Методическая разработка по дисциплине  
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Для студентов дневного отделения направления «Телекоммуникации»

Автор-составитель: к.т.н., доцент Ситникова С.В.



Самара, 2010

## Содержание

1. Цели, задачи и методы изучения дисциплины.....	3
2. Список рекомендованной литературы.....	4
3. Методические рекомендации по изучению дисциплины.....	4
4. Список теоретических вопросов для подготовки к зачету.....	8
5. Виды тестовых вопросов для подготовки к зачету.....	10
6. Общие замечания к выполнению комплексного задания.....	12
7. Комплексное задание.....	12
8. Краткие теоретические сведения и методические указания к выполнению задания.....	14
9. Исходные данные для комплексного задания.....	23
10. Пример решения комплексного задания .....	23
11. Пояснения к карте программированного контроля.....	34
Карта программированного контроля.....	34
Приложения.....	35

## 1. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Физические основы электроники» является базовой общей естественнонаучной дисциплиной для изучения специальных дисциплин, предусмотренных государственным образовательным стандартом.

**Целью** преподавания дисциплины является изучение студентами

- физических явлений и процессов, протекающих в различных электронных приборах и микросхемах,
- взаимосвязи между физическими закономерностями этих явлений и процессов в твердых телах с эксплуатационными характеристиками электронных приборов.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **иметь представление** о тенденциях развития электроники;
- **знать** физические основы функционирования электронных приборов;
- **уметь** анализировать явления и процессы, протекающие в кристаллических структурах, используемых в составе электронных компонентов.

Материал дисциплины базируется на сведениях, излагаемых в курсах «Физика», «Химия радиоматериалов», «Высшая математика». ПГУТИ организует для студентов очные виды занятий: лекции, групповые и индивидуальные консультации, практические занятия. Общая трудоемкость дисциплины составляет 102 часа.

Ниже приводится список рекомендуемой литературы и методические указания по освоению курса, изучив которые студент может подобрать себе оптимальный набор учебников. При самостоятельном изучении литературы следует вести краткий конспект и отвечать на контрольные вопросы. При подготовке к зачету следует ориентироваться на список вопросов, приведенный на стр. 7-9.

На зачете студент должен ответить на 2–3 теоретических вопроса, а также на вопросы по карте программированного контроля, контрольной работе и практическому занятию. Возможно проведение зачета в виде тестирования на персональном компьютере. Для удовлетворительной оценки студент должен знать программный материал в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, быть знаком с основной литературой, рекомендованной программой.

## 2. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. Учебник для вузов. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 480 с.
2. Бреус А. И., Савченко К. И., Сподобаев Ю. М. Электроника. Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2001. – 158 с.
3. Электронные приборы. В. Н. Дулин, Н. А. Аваев, В. П. Дёмин и др./ Под ред. Г. Г. Шишкина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.
4. Пасынков В. В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Издательство «Лань», 2001.
5. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника: Пер. с испан. С. И. Баскакова/ Под ред. В. А. Терехова. – М.: Высшая школа, 1991.
6. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2003. – 511 с.
7. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. Учеб. пособие. – М.: ЛБЗ, 2000. – 488 с.
8. Шука А. А. Электроника. Учебное пособие. СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 800 с.
9. Яровой Г.П. и др. Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие. Самара, 2003.
10. Захаров А.Г. Физические основы микроэлектроники. Учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ. 1999. -221с.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
12. Студеникин С. А., Физические основы микроэлектроники в вопросах и задачах. Новосибирск: НГУ, 1995.

## 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Электроника является динамично развивающейся областью науки и техники. Связано это с появлением новых электрорадиоматериалов, с открытием новых физических эффектов в уже известных материалах. Их применение позволяет получать изделия с высокой надежностью, быстродействием, устойчивостью к воздействиям окружающей среды, агрессивных сред, ионизирующих излучений, электромагнитных полей. Нанотехнологии позволяют манипулировать атомами, что дает возможность конструировать новые приборы с качественно новыми свойствами [8]. Рассмотрение физических основ работы типичных электронных устройств важно для любого современного специалиста.

Обычно изделия электроники делят на два больших класса: активные и пассивные. **Пассивные** дискретные элементы и компоненты предназначены для перераспределения электрической энергии: рези-

сторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы [6, с.110-172], интегральные схемы (ИС) в виде наборов пассивных элементов. Для изготовления резисторов применяют проводниковые материалы высокого сопротивления. Конденсатор состоит из двух проводящих обкладок и слоя диэлектрика между ними. Провод, намотанный в виде спирали на диэлектрический каркас – это катушка индуктивности.

К **активным** относят такие компоненты, которые способны преобразовывать электрические сигналы и/или усиливать их мощность. Это диоды, транзисторы, тиристоры, ИС и т.д. [1, 2, 3, 6]. Практически все активные приборы изготавливаются из полупроводниковых материалов или с их добавлением.

Основой большинства приборов служат кремний (Si), германий (Ge) и арсенид галлия (GaAs). Эти материалы в чистом виде обладают небольшим количеством полезных свойств, поэтому для создания приборов используют примесные полупроводники (донорные, акцепторные) или полупроводники с дефектами [1, 3, 4, 8]. *При изучении кристаллической решетки кремния или германия, обратите внимание на то, какие дефекты улучшают параметры приборов, а от каких желательно очистить монокристалл [2, 4]. Для понимания процессов, происходящих в полупроводниковых структурах, следует, изучить элементы зонной теории твердых тел [1-8].*

Так же используют один или несколько электрических переходов: p-n-переход, гетеропереход, переход металл-полупроводник [1].

Контакты электронного или дырочного полупроводников с металлами могут быть омическими или выпрямляющими. Омические контакты используются для организации электрических выводов от различных областей полупроводника, а выпрямляющие – для изготовления металл-полупроводниковых диодов (диод Шоттки). Для корректного подбора пары металл-полупроводник нужно знать соотношения между работами выхода электрона ( $A_{\text{вых}}$ ) из металла и полупроводника [1, с. 62-68, 152-156].

В гетеропереходе ширина запрещенной зоны в областях, образующих переход, различна. Это служит причиной скачков (разрывов) границ энергетических уровней  $W_{\text{п}}$  и  $W_{\text{в}}$  в пределах перехода. Наличие этих скачков приводят к целому ряду преимуществ гетеропереходов над гомопереходами (p-n), что широко используется в малогабаритной аппаратуре самого разного назначения [1, с.68-71].

Гетеропереходы и переходы Шоттки относятся к структурам без инжекции неосновных носителей заряда в базу, поэтому они более быстроедействующие, по сравнению с p-n-переходами.

Электронно-дырочный переход (р-п-переход) (также как и гетеро-переходы, и переходы Шоттки), обладает вентильными свойствами, т.е. односторонней проводимостью и используется в выпрямительных схемах. В равновесном состоянии р-п-перехода при отсутствии внешнего напряжения токи, создаваемые диффузионными и дрейфовыми потоками электронов и дырок взаимно компенсируют друг друга и результирующий ток равен нулю. Подача внешнего напряжения либо уменьшает потенциальный барьер (прямое напряжение), либо увеличивает его (обратное напряжение). В первом случае преобладает ток диффузии (прямой ток), создаваемый основными носителями каждой области и резко возрастающий с ростом прямого напряжения в связи с большим запасом основных носителей. Во втором случае диффузионный перенос зарядов прекращается и преобладает дрейфовый ток (обратный ток), создаваемый неосновными носителями зарядов. Поскольку концентрации неосновных зарядов в обеих областях малы, величина обратного тока чрезвычайно мала и теоретически не должна зависеть от величины обратного напряжения [1, 41-62,76-96,138-151].

При сильном энергетическом воздействии резко возрастает ток, что приводит к разрушению структуры кристалла - происходит тепловой пробой [1, с.113]. При частичном разрушении ковалентных связей разрушение кристалла не происходит, и пробой носит обратимый характер, т.е. после прекращения энергетического воздействия, разрушенные ковалентные связи восстанавливаются и кристалл возвращается в исходное состояние. В толстых (слабо легированных) р-п-переходах он осуществляется ударной ионизацией узлов кристалла (лавинный пробой) [1, с.103]. В тонких (сильно легированных - вырожденных) р-п-переходах пробой создаётся туннельным эффектом [1, с.111]. В режиме туннельного и лавинного пробоев работают стабилитроны – диоды, предназначенные для стабилизации обратного напряжения [1, с.167-172]. Сильно легированные полупроводники используются для создания туннельных и обращенных диодов [1, с.177-184].

Электронно-дырочный переход обладает некоторыми паразитными инерционными параметрами – диффузионной (действует в основном в прямом включении) и барьерной емкостью (в обратном включении), которые шунтируют часть полезного сигнала и увеличивают время переключения диода из одного состояния в другое. Переходы, в которых каким-либо способом уменьшают диффузионную емкость, т.е. уменьшают время переключения, используют в качестве импульсных диодов [1, с.148-155]. Переходы, в которых каким-либо способом увеличивают барьерную емкость, используют для создания варикапов – конденсаторов, управляемых обратным напряжением [1, с.184-188].

Изменения электрических свойств полупроводников и р–п-переходов под воздействием электромагнитного излучения происходит в силу того, что частицы электромагнитного поля (чаще всего инфракрасного, светового или ультрафиолетового диапазонов), проникая вглубь материала, способствуют повышению электропроводности полупроводника или появлению фото-ЭДС на границах р–п-перехода. Энергия фотонов, т.е. частота обучающего электромагнитного поля пропорциональны ширине запрещённой зоны материала полупроводника. Фотоэлектрические эффекты используются в фоторезисторах, фотодиодах, солнечных фотоэлементах, фототранзисторах и других фотоэлектрических приборах, преобразующих энергию электромагнитных волн в электрическую энергию [1, с.31-35, 378-401].

Полупроводниковые приборы на основе электрических переходов, преобразующие электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения, называются светодиодами [1, с.362]. Существуют излучающие диоды в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра.

Реже в электронике реже используются взаимобратные эффекты Зеебека и Пельтье [1, с.428-433]. Эффект Зеебека приводит к возникновению термо-ЭДС на концах спаев из двух различных токопроводящих материалов. Эффект Пельтье приводит к поглощению или выделению в местах спаев двух разнородных проводников избыточной по сравнению с джоулевой теплоты.

Гальваномагнитный эффект Холла заключается в возникновении поперечной ЭДС в кристалле, по которому протекает ток, при помещении его в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока. На этом эффекте изготавливаются датчики Холла [1, с.442-453].

Одной из важных задач полупроводниковой электроники является увеличение рабочих частот и быстродействия приборов. Физическими ограничениями, определяющими предел быстродействия различных приборов, являются: конечность времени релаксации заряда, конечность скоростей движения носителей заряда, действие постоянных времени перезаряда емкостей переходов. Другой проблемой является повышение допустимой мощности рассеяния, что трудно осуществить не в ущерб быстродействию этих приборов. Для решения задач необходимо всестороннее изучение физических процессов, происходящих в полупроводниковых приборах, совершенствование технологий их производства, разработка новых технологических приемов, изыскание новых принципов действия и эффектов, с помощью которых можно выполнять необходимые функциональные преобразования.

#### 4. СПИСОК ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ

1. Элементы зонной теории твердого тела. Разрешенные и запрещенные зоны. Чем отличаются металл, диэлектрик и полупроводник с точки зрения зонной теории?
2. Кристаллическая решетка твердого тела. Индексы Миллера кристаллографических плоскостей и направлений. Типы связей. Дефекты решетки.
3. Собственный полупроводник. Диаграмма энергетических уровней собственного германиевого (кремниевое) полупроводника.
4. Примесные полупроводники. Доноры и акцепторы.
5. Электронный полупроводник. Диаграмма энергетических уровней германиевого (кремниевое) полупроводника.
6. Дырочный полупроводник. Диаграмма энергетических уровней германиевого (кремниевое) полупроводника.
7. Понятия об основных и неосновных носителях заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Концентрация основных и неосновных носителей в собственном и примесном полупроводниках.
8. Распределение носителей по энергии. Статистика Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
9. Электропроводность полупроводника. Дрейф, диффузия, подвижность носителей.
10. Диффузионные и дрейфовые токи в полупроводниках.
11. Положение уровня Ферми в собственном и примесном полупроводниках. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации примеси и температуры. Вырожденные и невырожденные полупроводники.
12. Контактная разность потенциалов.
13. Образование электронно-дырочного перехода. Методы формирования. Диаграмма энергетических уровней электронно-дырочного перехода.
14. P-N-переход при подаче прямого напряжения. Явление инжекции основных носителей заряда. Диаграмма энергетических уровней.
15. P-N-переход при подаче обратного напряжения. Явление экстракции неосновных носителей заряда. Диаграмма энергетических уровней.
16. Вольт-амперная характеристика идеального p-n-перехода. Влияние температуры и ширины запрещенной зоны на вольт-амперную характеристику.
17. Вольт-амперная характеристика реального p-n-перехода.
18. Выпрямительные и импульсные диоды.



19. Физические явления (туннельный эффект, ударная ионизация и т.д.), вызывающие отклонения от идеализированной модели.
20. Обратные и туннельные диоды.
21. Виды пробоя в электронно-дырочном переходе.
22. Туннельный и лавинный пробой обратно смещенного p-n перехода. Стабилитрон и стабилстор.
23. Инерционные свойства перехода. Барьерная и диффузионная емкости. Эквивалентная схема p-n перехода.
24. Варикапы.
25. Работа выхода электронов.
26. Образование контакта металл-полупроводник. Диаграмма энергетических уровней *омического* контакта металл-полупроводник.
27. Образование контакта металл-полупроводник. Диаграмма энергетических уровней *выпрямительного* контакта металл-полупроводник. Диоды Шоттки.
28. Физические процессы в контактах полупроводников с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходах). Диаграмма энергетических уровней в состоянии равновесия и при подаче напряжения.
29. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и переходах. Фотопроводимость и фотогальванический эффект.
30. Фотодиод.
31. Термоэлектрические явления в полупроводниках. Эффект Зеебека.
32. Термоэлектрические явления в полупроводниках. Эффект Пельтье.
33. Гальваномагнитный эффект Холла.
34. Электронная эмиссия. Виды электронной эмиссии.
35. Понятие о плазме и электрическом разряде в газе.
36. Физические процессы в электровакуумных, газоразрядных и индикаторных приборах.
37. Классификация приборов по функциональному назначению, используемым физическим явлениям, технологии изготовления, виду рабочей среды, по виду энергии, действующей на входе и выходе прибора.
38. Светодиоды. Индикаторы на светодиодах.
39. Инфракрасные диоды.
40. Графоаналитический расчет параметров диодов.

## 5. ВИДЫ ТЕСТОВЫХ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ

1. *Наибольшим (наименьшим) удельным сопротивлением (удельной проводимостью, шириной запрещенной зоны) обладают*

- диэлектрики;
- полупроводники;
- проводники.

2. *Полупроводник, в котором концентрация дырок (электронов) превышает концентрацию электронов проводимости (дырок), относится к полупроводникам*

- i-типа;
- n-типа;
- p-типа.

3. *Атомы алюминия (бора, галлия, индия, мышьяка, сурьмы, фосфора) в кристалле кремния или германия образуют:*

- акцепторную примесь;
- донорную примесь.

4. *При ионизации акцепторного (донорного) атома возникает подвижный носитель заряда -*

- акцепторный ион;
- валентный электрон;
- дырка;
- электрон проводимости.

5. *С увеличением концентрации акцепторной примеси концентрации дырок и электронов проводимости в полупроводнике изменятся следующим образом:*

- концентрации дырок и электронов проводимости не изменятся;
- концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости не изменится;
- концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости уменьшится;
- концентрация дырок уменьшится, концентрация электронов проводимости увеличится.

6. *На диаграмме энергетических уровней в полупроводнике n-типа [p-типа] примесная энергетическая зона расположена:*

- в запрещённой зоне вблизи верхней границы валентной зоны;
- в запрещённой зоне вблизи нижней границы зоны проводимости;
- в середине запрещённой зоны.

7. *Большой подвижностью в полупроводнике обладают носители заряда -*

- дырки;
- электроны проводимости.

8. С увеличением концентрации акцепторной [донорной] примеси [температуры] в полупроводнике уровень Ферми
- не изменится;
  - приблизится к дну зоны проводимости;
  - приблизится к потолку валентной зоны.
9. Векторы скорости дрейфа дырок [электронов] и напряжённости электрического поля:
- направлены противоположно;
  - сонаправлены.
10. С увеличением концентрации акцепторной примеси удельное сопротивление полупроводника *p*-типа [контактная разность потенциалов в *p*-*n*-переходе, толщина *p*-*n*-перехода]:
- не изменится;
  - увеличится;
  - уменьшится.
11. В *p*-*n*-переходе, включенном в прямом [обратном] направлении, преобладает составляющая полного тока -
- диффузионная;
  - дрейфовая.
12. При увеличении прямого [обратного] напряжения, приложенного к *p*-*n*-переходу, высота потенциального барьера [толщина обеднённого слоя в переходе] в переходе:
- не изменится;
  - увеличится;
  - уменьшится.
13. Стабилитроны изготавливают из
- германия;
  - кремния;
  - арсенида галлия.
14. Использование туннельного диода в качестве генератора объясняется наличием
- емкости *p*-*n*-перехода;
  - на ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
  - малого статического сопротивления.
15. Допустимая температура на переходе германиевых диодов составляет:
- 50 °С;
  - 100 °С;
  - 150 °С;
  - 200 °С.

## 6. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОМПЛЕКСНОГО ЗАДАНИЯ

Учебным планом предусмотрено выполнение домашнего задания, которое призвано закрепить теоретический материал курса.

При выполнении комплексного задания необходимо соблюдать следующие правила:

– работа может выполняться в обычной ученической тетради, титульный лист должен быть аккуратно заполнен;

– для замечаний преподавателя и внесения студентом исправлений и дополнений по результатам рецензии, рекомендуется оставлять поля не менее 3–4 см или писать только с одной стороны листа;

– условия задач должны быть записаны полностью;

– решение задач должно сопровождаться подробными пояснениями;

– графики, рисунки, таблицы и чертежи должны быть пронумерованы;

– **все чертежи должны выполняться карандашом**, все величины, определяемые из графика, должны быть указаны на чертеже;

– **расчетные формулы должны приводиться в общем виде с объяснением буквенных обозначений**; числовые значения следует подставлять только в стандартных единицах международной системы СИ; в конечном результате должна быть **обязательно проставлена размерность рассчитанной величины**;

– в конце работы студент должен указать список использованной литературы, составленный по ГОСТу, **поставить свою подпись и дату**.

## 7. КОМПЛЕКСНОЕ ЗАДАНИЕ

**Задача 1.** Для заданного полупроводникового материала при заданной температуре определить параметры: ширину запрещенной зоны  $\Delta W$ , эффективные массы электронов и дырок  $m_n$  и  $m_p$ , эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$ , равновесные концентрации подвижных носителей зарядов  $n_i = p_i$  в собственном полупроводнике.

**Задача 2.** Определить концентрации основных ( $n_n, p_p$ ) и неосновных носителей ( $p_n, n_p$ ) при легировании полупроводникового кристалла донорными или акцепторными примесями с концентрациями  $N_a$  и  $N_d$ .

**Задача 3.** Определить положение уровня Ферми в собственном  $W_{Fi}$ , электронном  $W_{Fn}$  и дырочном  $W_{Fp}$  полупроводниках. Построить энергетические (зонные) диаграммы полупроводников в масштабе по оси энергий, принимая за начало отсчета нижний уровень зоны проводимости ( $W_c=0$ ).

**Задача 4.** Определить высоту потенциального барьера  $\varphi_{k0}$ , возникающего при образовании идеального электронно-дырочного перехода в состоянии равновесия.

**Задача 5.** Определить ширину электронно-дырочного перехода  $\delta_0$  и размеры обедненных слоев  $p$ - и  $n$ - областей ( $\delta_{p0}, \delta_{n0}$ ) в состоянии равновесия. Построить в масштабе энергетическую диаграмму электронно-дырочного перехода в состоянии равновесия, принимая за начало отсчета нижний уровень зоны проводимости [верхний уровень валентной зоны].

**Задача 6.** Определить высоту потенциального барьера  $\Delta\varphi$ , ширину электронно-дырочного перехода  $\delta$  и размеры обедненных слоев  $p$ - и  $n$ - областей ( $\delta_p, \delta_n$ ) при подаче на переход внешнего напряжения  $U$ . Построить в масштабе энергетическую диаграмму электронно-дырочного перехода при подаче на него прямого или обратного напряжения  $U$ .

**Задача 7.** Рассчитать барьерную  $C_b$  и диффузионную  $C_{диф}$  ёмкости перехода. Значение диффузионной длины электронов  $L_n = 0.04 \times H$  (мм), а значение диффузионной длины дырок  $L_p = 0.02 \times H$  (мм), где  $H$  - последняя цифра студенческого билета.

**Задача 8.** Определить удельную проводимость полупроводников типа  $p$  и  $n$  ( $\sigma^n, \sigma^p$ ), образующих электронно-дырочный переход и удельное сопротивление  $p$  и  $n$ - областей ( $\rho^n, \rho^p$ ).

**Задача 9.** Определить величину обратного тока насыщения в переходе  $I_0$ .

**Задача 10.** Определить ток, протекающий в переходе при заданном напряжении, и статическое сопротивление перехода.

**Задача 11.** Опишите методы изготовления, принцип действия  $p$ - $n$ -перехода при прямом и обратном включении.

## 8. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

### 1. Определение параметров полупроводникового материала

Каждый электрон, входящий в состав атома, обладает определенной энергией или занимает определенный энергетический уровень. В твердом теле, благодаря взаимодействию атомов в кристаллической решетке, энергетические уровни расщепляются и образуют энергетические зоны, состоящие из отдельных близко расположенных по энергии уровней, число которых соответствует числу однородных атомов в данном кристаллическом теле. Энергетические уровни валентных электронов при расщеплении образуют **валентную зону**. Разрешенные уровни, свободные от электронов в невозбужденном состоянии атома образуют одну или несколько свободных зон, нижнюю из которых называют **зоной проводимости**. Между разрешенными зонами находятся **запрещенные зоны**, т.е. области значений энергий, которыми не могут обладать электроны в идеальном кристалле. Формально к полупроводникам относят вещества с шириной запрещенной зоны  $\Delta W \leq 0.05...3 \text{ эВ}$ . В нижеприведенных формулах энергия понимается в смысле ее значения, нормированного к элементарному электрическому заряду. Для отличия энергетических величин от потенциалов размерность энергий принято обозначать «эВ».

1.1. При температурах  $T > 200...250 \text{ K}$  ширина запрещенной зоны изменяется по линейному закону:

$$\Delta W = \beta - \alpha \cdot T, \text{ эВ} \quad (1)$$

где  $\beta$  – экстраполированный член, а  $\alpha$  – коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны,  $T$  – абсолютная температура ( $T[K] = t^{\circ}C + 273$ ). Числовые значения этих коэффициентов приведены в таб.1

Таблица 1

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$\beta, \text{ эВ}$	0,782	1,205	1,549
$\alpha, \text{ эВ/K}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$

1.2. Эффективные массы электронов  $m_n$  и дырок  $m_p$  учитывают сложный характер взаимодействия электрона с кристаллической решеткой при его движении под действием силы внешнего электрического поля. Определить их можно, используя данные таблицы 2.

Таблица 2

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$m_n / m_0$	0,55	1,084	0,067
$m_p / m_0$	0,388	0,56	0,48
Масса покоя электрона $m_0$	$9,109 \times 10^{-31}$ кг		

1.3. Эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$  имеют смысл концентраций разрешенных состояний в энергетической полосе  $kT$  у границ соответственно зоны проводимости или валентной зоны и определяются выражениями:

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT \cdot m_n}{h^2} \right)^{3/2} ; \quad N_v = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT \cdot m_p}{h^2} \right)^{3/2}, \text{ м}^{-3}. \quad (2)$$

Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$ :

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4}, \text{ м}^{-3} \quad (3)$$

где  $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж / К – постоянная Больцмана;  $\pi = 3.14159$ ;  
 $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка .

1.4. Свойства полупроводников сильно зависят от концентрации и вида примесей. Полупроводник без примесей или с очень низкой их концентрацией, которая не оказывает существенного влияния на удельную проводимость, называется собственным. Для собственного (чистого или идеального) полупроводника **равновесные концентрации электронов и дырок**  $n_i = p_i$  определяются выражением:

$$n_i = p_i = N \cdot \exp\left(\frac{\Delta W(\text{эВ}) \cdot e(\text{Кл})}{2kT}\right), \text{ м}^{-3}, \quad (4)$$

где  $\Delta W = W_v - W_c$  - ширина запрещенной зоны полупроводника (1),  $W_c$  и  $W_v$  - «дно» зоны проводимости и «потолок» валентной зоны соответственно,  $e = -1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл – абсолютное значение заряда электрона. Экспоненциальный множитель обуславливает резкое увеличение  $n_i$  при возрастании температуры или уменьшении ширины запрещенной зоны.

## 2. Определение концентраций носителей заряда в примесных полупроводниках

Примесные полупроводники кроме основных валентных атомов содержат в кристаллической решетке атомы других элементов с валентностью ниже или выше валентности основных. Например, введение пятивалентных примесей (P, As, Sb) в четырехвалентные Ge и Si, и шестивалентных для соединения GaAs, образует электронный полупроводник – *n*-типа. Такие примеси называются **донорными**. Введение трехвалентных примесей (B, Al, In) в четырехвалентные Ge и Si, и двухвалентных для соединения GaAs, образует дырочный полупроводник – *p*-типа. Такие примеси называются **акцепторными**.

2.1. Носители зарядов, концентрация которых в данном полупроводнике больше (например, в полупроводнике *n*-типа – электроны, а в полупроводнике *p*-типа – дырки) называются основными. **Концентрация электронов в электронном полупроводнике  $n_n$**  зависит от концентрации донорных примесей:

$$n_n = n_i + N_d, \text{ м}^{-3} \quad (5)$$

а **концентрация дырок в дырочном полупроводнике  $p_p$**  зависит от концентрации акцепторных примесей:

$$p_p = p_i + N_a = n_i + N_a, \text{ м}^{-3}. \quad (6)$$

2.2. Концентрации неосновных носителей (дырок в электронном и электронов в дырочном полупроводниках) можно определить по формулам:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad \text{и} \quad n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a}, \text{ м}^{-3}. \quad (7)$$

В рабочем диапазоне температур практически все атомы примеси оказываются ионизированными, поэтому с учётом того, что на практике концентрации примесей выбираются из условий  $N_d \gg n_i$  и  $N_a \gg p_i$ , для концентраций основных носителей зарядов полупроводников *n*- и *p*- типов с весьма высокой степенью приближения соответственно выполняются условия  $n_n \approx N_d$  и  $p_p \approx N_a$ .

## 3. Определение положения уровней Ферми в собственном и примесных полупроводниках.

Распределение электронов по энергиям в твердом теле подчиняется статистике Ферми – Дирака. Уровень Ферми – уровень энергии, которую могут иметь 50% всех носителей, находящихся в полупроводнике.



3.1. Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещённой зоны и, при условии  $W_c = 0$ , определяется выражением:

$$W_{Fi} = \frac{W_v - W_c}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n}, \text{ эВ.} \quad (8)$$

3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике  $p$ -типа (рис.1) определяется выражением:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a}{n_i}, \text{ эВ.} \quad (9)$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике  $n$ -типа (рис.2) определяется выражением:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_d}{n_i}, \text{ эВ.} \quad (10)$$

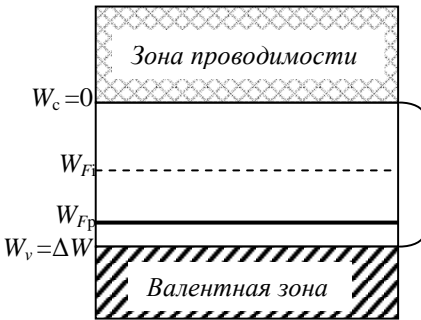


Рис. 1. Энергетическая диаграмма полупроводника  $p$ -типа.

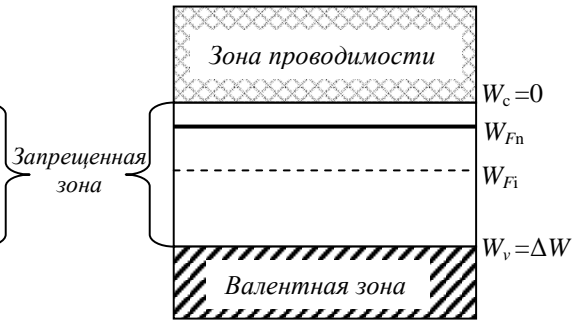


Рис. 2. Энергетическая диаграмма полупроводника  $n$ -типа.

#### 4. Определение высоты потенциального барьера, возникающего при образовании $p$ - $n$ -перехода.

При образовании двухслойных контактов (переходов)  $p$ - $i$ - или  $p$ - $n$ - между полупроводниками, образующими их, в результате перераспределения подвижных носителей зарядов происходит выравнивание уровней Ферми, т.е. в каждом случае формируется уровень Ферми единый для всего контакта. В результате, на границе раздела в области контакта происходит деформация энергетических зон и образование энергетического и потенциального барьеров (контактной разности потенциалов). Высоту потенциального барьера (контактную разность

потенциалов) в идеальном электронно-дырочном переходе **в состоянии равновесия**, т. е. при отсутствии внешнего напряжения, можно определить:

$$\varphi_{k0} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p}, \text{ В.} \quad (11)$$

### 5. Определение ширины электронно-дырочного перехода и размеров обедненных слоев *p*- и *n*-областей в состоянии равновесия

5.1. **Ширина** идеального электронно-дырочного перехода в состоянии равновесия  $\delta_0$  определяется выражением:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \cdot \varphi_{k0}}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \text{ м} \quad (12)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника:  $\varepsilon_{Ge} = 16$ ,  $\varepsilon_{Si} = 12$ ,  $\varepsilon_{GaAs} = 13,1$ .

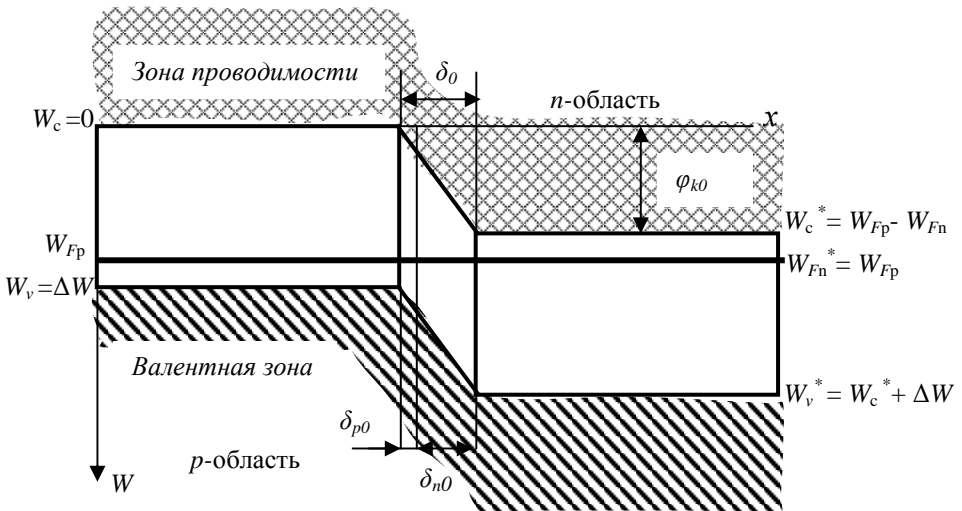


Рис.3. Энергетическая диаграмма *p-n*-перехода в состоянии равновесия (при отсутствии внешнего электрического поля).

5.2. Размеры обедненных слоев  $p$ - и  $n$ - областей ( $\delta_{p0}, \delta_{n0}$ ) в состоянии равновесия зависят от концентраций донорных и акцепторных примесей:

$$\delta_{p0} = \frac{N_{\delta}}{N_{\delta} + N_a} \delta_0; \delta_{n0} = \frac{N_a}{N_{\delta} + N_a} \delta_0, \text{ м.} \quad (13)$$

5.3. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода, находящегося в состоянии равновесия показана на рис.3. При построении диаграммы следует указывать численные значения энергий и др. параметров. На рис.3 показан случай, когда ширина обедненного  $p$ -слоя меньше ширины  $n$ -слоя, в вашем расчете может быть и другое соотношение этих параметров.

## 6. Определение параметров перехода при подаче внешнего напряжения

6.1. При подаче внешнего напряжения высота потенциального барьера в идеальном  $p$ - $n$ -переходе уменьшается при прямом включении и увеличивается при обратном (обратное напряжение берется со знаком «минус»):

$$\Delta\varphi = \varphi_{k0} - U, \text{ В} \quad (14)$$

Уровень Ферми в пределах  $p$ - $n$  перехода смещается на величину поданного фиксированного внешнего напряжения  $U$ .

Равновесное состояние  $p$ - $n$  перехода нарушается, и через него преимущественно протекают либо диффузионные потоки основных зарядов (при  $U > 0$ ), либо дрейфовые потоки неосновных зарядов (при  $U < 0$ ).

6.2. При подаче внешнего напряжения ширина электронно-дырочного перехода уменьшается при прямом включении и увеличивается при обратном:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \Delta\varphi}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_{\delta}} \right)}, \text{ м.} \quad (15)$$

6.3. Размеры обедненных слоев  $p$ - и  $n$ - областей ( $\delta_p, \delta_n$ ) зависят от концентраций донорных и акцепторных примесей:

$$\delta_p = \frac{N_{\delta}}{N_{\delta} + N_a} \delta; \delta_n = \frac{N_a}{N_{\delta} + N_a} \delta, \text{ м.} \quad (16)$$

6.4. Энергетические диаграммы  $p$ - $n$ -перехода при подаче внешнего напряжения показаны на рис.4 и 5.

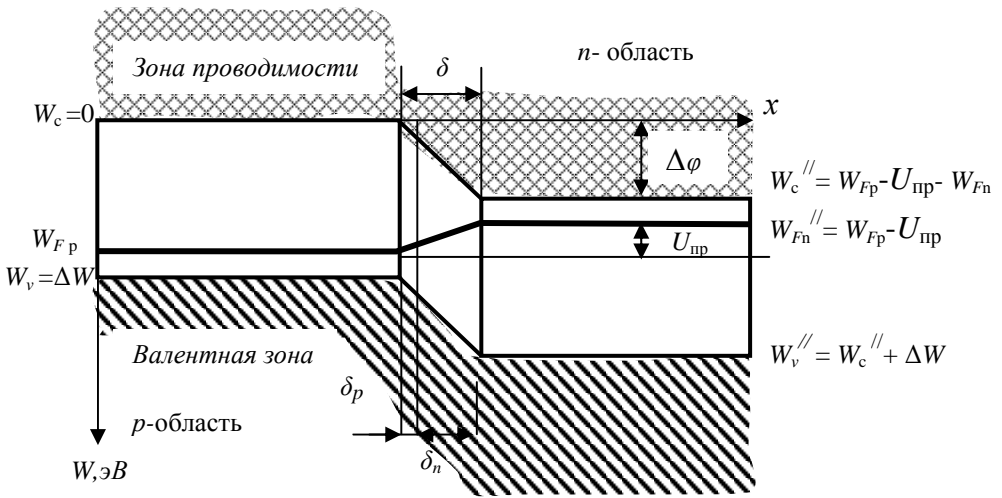


Рис.4. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода, включенного в прямом направлении.

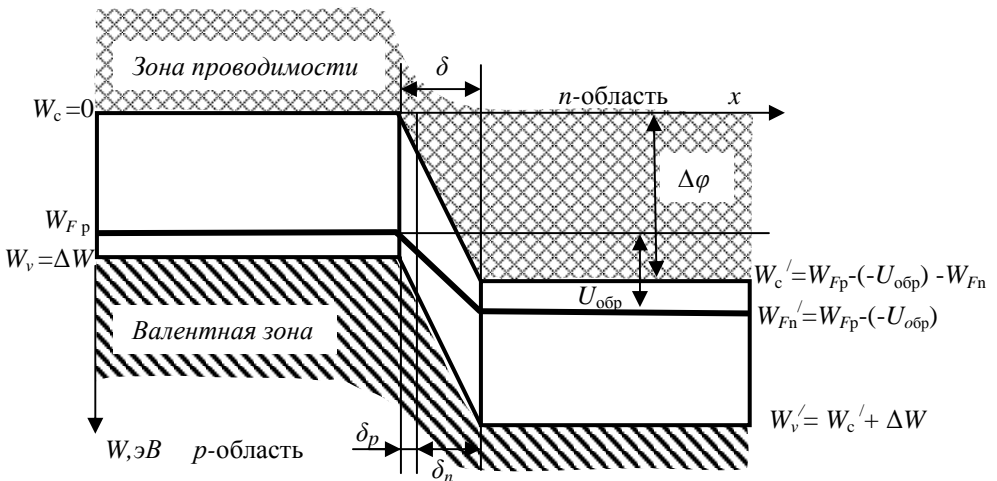


Рис.5. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода, включенного в обратном направлении.

## 7. Определение паразитных емкостей перехода

Суммарная ёмкость  $p$ - $n$ -перехода  $C$  складывается из барьерной ёмкости  $C_{\bar{\sigma}}$  и диффузионной ёмкости  $C_d$ . Диффузионная ёмкость обусловлена неравновесными подвижными носителями заряда, накопленными во внешних (необеднённых) частях  $p$ - и  $n$ -областей.

$$C_d = \frac{e^2 S}{kT} (L_p p_n + L_n n_p) \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad \Phi \quad (17)$$

где  $S$  - площадь перехода,  $L_p$  и  $L_n$  - диффузионные длины неосновных носителей.

Барьерная ёмкость обусловлена зарядами донорных и акцепторных ионов, располагающихся в обеднённом слое перехода.

$$C_{\bar{\sigma}} = S \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot e}{2} \frac{N_a N_{\bar{\sigma}}}{(N_a + N_{\bar{\sigma}})} \frac{1}{\Delta \phi}}, \quad \Phi. \quad (18)$$

## 8. Определение удельных сопротивлений и проводимостей $p$ - и $n$ -областей, образующих электрический переход

8.1. Удельную проводимость можно оценить зависимостями:

$$\text{для электронного полупроводника } \sigma^n = \sigma_n + \sigma_p = n_n e \mu_n + p_n e \mu_p; \quad (19)$$

$$\text{для дырочного полупроводника } \sigma^p = \sigma_p + \sigma_n = p_p e \mu_p + n_p e \mu_n; \quad (20)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  - подвижность электронов и дырок.

С учетом того, что концентрации основных носителей много больше концентрации неосновных, проводимости полупроводников можно рассчитать по приближенным формулам:

$$\text{для электронного полупроводника } \sigma^n \approx n_n e \mu_n \approx N_{\bar{\sigma}} e \mu_n; \quad (21)$$

$$\text{для дырочного полупроводника } \sigma^p \approx p_p e \mu_p \approx N_a e \mu_p. \quad (22)$$

Подвижности носителей заряда  $\mu_n$  и  $\mu_p$  зависят от температуры  $T$  и концентрации примесей  $N_{\bar{\sigma}}$  и  $N_a$  в областях, образующих электронно-дырочный переход. В данной работе будем учитывать только температурное изменение подвижности носителей заряда:

$$\text{Для кремния: } \mu_n = 0,14 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2}, \quad \mu_p = 0,048 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2}, \quad M^2/(B \cdot c); \quad (23)$$

$$\text{Для германия: } \mu_n = 0,39 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2}, \quad \mu_p = 0,19 \left(\frac{T}{300}\right)^{-3/2}, \quad M^2/(B \cdot c); \quad (24)$$

Для арсенида галлия:

$$\mu_n = 0,95 \left( \frac{T}{300} \right)^{-2}, \quad \mu_p = 0,045 \left( \frac{T}{300} \right)^{-2,5}, \quad \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с}). \quad (25)$$

8.2. Удельные объёмные сопротивления  $p$  и  $n$ - областей вычисляются по формулам:  $\rho_n = 1/\sigma_n$  и  $\rho_p = 1/\sigma_p$  (Ом×м). (26)

## 9. Определение обратного тока в переходе

9.1. Обратный ток (ток насыщения или ток экстракции идеального  $p$ - $n$  перехода) зависит от многих параметров: площади перехода  $S$ , коэффициентов диффузии электронов и дырок ( $D_n$  и  $D_p$ ), диффузионных длин неосновных носителей ( $L_p$  и  $L_n$ ) или:

$$I_0 = eS \left( \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \quad (27)$$

9.2. Коэффициенты диффузии зависят от температуры и подвижности носителей заряда (23)-(25):

$$D_p = \frac{kT\mu_p}{e}; \quad D_n = \frac{kT\mu_n}{e}, \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (28)$$

## 10. Определение силы тока и статического сопротивления при заданном внешнем напряжении

10.1. Сила тока в переходе  $I$  и приложенное к переходу внешнее напряжение  $U$  связаны уравнением вольт-амперной характеристики электрического перехода:

$$I = f(U) = I_0 \cdot \left( \exp \frac{U \cdot e}{kT} - 1 \right), \quad \text{А}. \quad (29)$$

10.2. Статическое сопротивление  $p$ - $n$ -перехода есть отношение постоянного внешнего напряжения, приложенного к переходу, к току, протекающему в переходе:

$$R = \frac{U}{I}, \quad \text{Ом} \quad (30)$$

При обратном напряжении  $I=I_0$ .

### 9. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАДАНИЯ

№ вар.	Материал	$t^0$ , C	$N_{\phi}$ , $1/\text{м}^3$	$N_{\omega}$ , $1/\text{м}^3$	$U$ , B	$S$ , $\text{м}^2$
00	Si	42	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$	-4	$4 \times 10^{-6}$
01	Si	43	$7 \times 10^{22}$	$1 \times 10^{19}$	-4.5	$5 \times 10^{-6}$
02	Si	44	$7.5 \times 10^{20}$	$2 \times 10^{22}$	-4.2	$6 \times 10^{-6}$
03	Si	45	$3.5 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{23}$	-5	$1.7 \times 10^{-6}$
04	Si	25	$8 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{20}$	-5.5	$1.8 \times 10^{-6}$
05	GaAs	24	$1 \times 10^{22}$	$5 \times 10^{21}$	1	$1 \times 10^{-6}$
06	GaAs	25	$1 \times 10^{19}$	$5 \times 10^{22}$	0.98	$2 \times 10^{-6}$
07	GaAs	26	$1 \times 10^{22}$	$5 \times 10^{20}$	0.96	$3 \times 10^{-6}$
08	GaAs	27	$2 \times 10^{22}$	$6 \times 10^{22}$	1.1	$4 \times 10^{-6}$
09	GaAs	28	$2 \times 10^{19}$	$7 \times 10^{19}$	0.8	$5 \times 10^{-6}$
10	Ge	23	$9 \times 10^{22}$	$1.5 \times 10^{23}$	-3.2	$2 \times 10^{-6}$
11	Ge	41	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$	-3.5	$3 \times 10^{-6}$
12	Ge	42	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$	-4	$4 \times 10^{-6}$
13	Ge	43	$7 \times 10^{22}$	$1 \times 10^{19}$	-4.5	$5 \times 10^{-6}$
14	Ge	44	$7.5 \times 10^{20}$	$2 \times 10^{22}$	-4.2	$6 \times 10^{-6}$
15	Ge	45	$3.5 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{23}$	-5	$1 \times 10^{-6}$
16	Ge	25	$8 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{20}$	-5.5	$3.2 \times 10^{-6}$
17	Ge	20	$8 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{22}$	-6	$3.5 \times 10^{-6}$
18	Ge	30	$9 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{23}$	-6.6	$1 \times 10^{-7}$
19	Ge	15	$6 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{20}$	-1.2	$2 \times 10^{-7}$
20	Si	28	$2 \times 10^{23}$	$7 \times 10^{18}$	0.5	$5 \times 10^{-6}$
21	Si	29	$2 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{19}$	0.45	$6 \times 10^{-6}$
22	Si	30	$3 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{22}$	0.59	$4 \times 10^{-6}$
23	Si	31	$3 \times 10^{23}$	$6 \times 10^{20}$	0.7	$3 \times 10^{-6}$
24	Si	32	$3 \times 10^{20}$	$7 \times 10^{19}$	0.5	$5.5 \times 10^{-6}$
25	Si	35	$4 \times 10^{22}$	$7 \times 10^{22}$	0.77	$1 \times 10^{-7}$
26	GaAs	33	$5 \times 10^{20}$	$9 \times 10^{20}$	-1.5	$4.4 \times 10^{-7}$
27	GaAs	20	$6 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{21}$	-1.7	$3.3 \times 10^{-7}$
28	GaAs	21	$7 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{22}$	-2.7	$2.2 \times 10^{-7}$
29	GaAs	22	$8 \times 10^{19}$	$9 \times 10^{19}$	-3	$1 \times 10^{-6}$
30	GaAs	23	$9 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{23}$	-3.2	$2 \times 10^{-6}$
31	GaAs	41	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$	-3.5	$3 \times 10^{-6}$
32	Ge	21	$7 \times 10^{20}$	$8.5 \times 10^{22}$	-2.7	$3 \times 10^{-7}$
33	Ge	22	$8 \times 10^{19}$	$9.5 \times 10^{19}$	-3	$1 \times 10^{-6}$
34	Ge	23	$9 \times 10^{22}$	$1.5 \times 10^{23}$	-3.2	$2 \times 10^{-6}$
35	Ge	41	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$	-3.5	$3 \times 10^{-6}$
36	Ge	42	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$	-4	$4 \times 10^{-6}$
37	Ge	43	$7 \times 10^{22}$	$1 \times 10^{19}$	-4.5	$5 \times 10^{-6}$

<i>№ вар.</i>	<i>Материал</i>	$t^0, C$	$N_D, 1/M^3$	$N_B, 1/M^3$	$U, B$	$S, M^2$
38	GaAs	37	$4 \times 10^{19}$	$7.5 \times 10^{21}$	-0.5	$2 \times 10^{-7}$
39	GaAs	38	$4 \times 10^{20}$	$3.5 \times 10^{18}$	-0.8	$3 \times 10^{-7}$
40	GaAs	39	$5 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{22}$	-0.9	$4 \times 10^{-7}$
41	GaAs	40	$5 \times 10^{21}$	$8 \times 10^{17}$	-1	$5 \times 10^{-7}$
42	GaAs	36	$5 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{18}$	-2	$1.6 \times 10^{-7}$
43	Si	37	$4 \times 10^{23}$	$7.5 \times 10^{21}$	-0.5	$2 \times 10^{-7}$
44	Si	38	$4 \times 10^{20}$	$3.5 \times 10^{18}$	-0.8	$3 \times 10^{-7}$
45	Si	39	$5 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{22}$	-0.9	$4 \times 10^{-7}$
46	Si	40	$5 \times 10^{21}$	$8 \times 10^{17}$	-1	$5 \times 10^{-7}$
47	Si	36	$5 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{18}$	-2	$6 \times 10^{-7}$
48	Si	33	$5.5 \times 10^{20}$	$9 \times 10^{20}$	-1.5	$1.5 \times 10^{-7}$
49	Ge	24	$1 \times 10^{22}$	$5 \times 10^{21}$	0.22	$1 \times 10^{-6}$
50	Ge	25	$1 \times 10^{23}$	$5 \times 10^{22}$	0.24	$2 \times 10^{-6}$
51	Ge	26	$1 \times 10^{22}$	$5.5 \times 10^{20}$	0.2	$3 \times 10^{-6}$
52	Ge	27	$2 \times 10^{22}$	$6 \times 10^{22}$	0.2	$4 \times 10^{-6}$
53	Ge	28	$2 \times 10^{23}$	$7 \times 10^{19}$	0.12	$5 \times 10^{-6}$
54	GaAs	42	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$	-4	$4 \times 10^{-6}$
55	GaAs	43	$7 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{19}$	-4.5	$5 \times 10^{-6}$
56	GaAs	44	$7.5 \times 10^{20}$	$2 \times 10^{22}$	-4.2	$6 \times 10^{-6}$
57	GaAs	45	$3.5 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{23}$	-5	$2.4 \times 10^{-6}$
58	Si	20	$6 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{21}$	-1.7	$3.6 \times 10^{-7}$
59	Si	21	$7 \times 10^{20}$	$8.5 \times 10^{22}$	-2.7	$2.5 \times 10^{-7}$
60	Si	22	$8 \times 10^{19}$	$9.5 \times 10^{19}$	-3	$1 \times 10^{-6}$
61	Si	23	$9 \times 10^{22}$	$1.5 \times 10^{23}$	-3.2	$2 \times 10^{-6}$
62	Si	41	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$	-3.5	$3 \times 10^{-6}$
63	Ge	29	$2 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{21}$	0.14	$6 \times 10^{-6}$
64	Ge	30	$3 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{22}$	0.22	$1.7 \times 10^{-6}$
65	Ge	31	$3 \times 10^{24}$	$6 \times 10^{20}$	0.25	$2.8 \times 10^{-6}$
66	Ge	32	$3 \times 10^{21}$	$7 \times 10^{21}$	0.2	$3.9 \times 10^{-6}$
67	Ge	35	$4 \times 10^{22}$	$7 \times 10^{22}$	0.35	$1 \times 10^{-7}$
68	Ge	25	$4.5 \times 10^{21}$	$4.5 \times 10^{22}$	0.25	$2.7 \times 10^{-6}$
69	Si	20	$8 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{22}$	-6	$3.5 \times 10^{-6}$
70	Si	30	$9 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{23}$	-6.6	$1 \times 10^{-7}$
71	Si	15	$6.9 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{20}$	-1.2	$2 \times 10^{-7}$
72	GaAs	25	$8 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{20}$	-5.5	$6 \times 10^{-6}$
73	GaAs	20	$8 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{22}$	-6	$4 \times 10^{-6}$
74	GaAs	30	$9 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{23}$	-6.6	$1 \times 10^{-7}$
75	GaAs	15	$6.9 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{20}$	-1.2	$2 \times 10^{-7}$



№ вар.	Материал	$t^0C$	$N_{\phi}, 1/M^3$	$N_{\omega}, 1/M^3$	$U, B$	$S, M^2$
76	GaAs	10	$9 \times 10^{20}$	$4 \times 10^{22}$	1.1	$3 \times 10^{-7}$
77	GaAs	18	$8.5 \times 10^{21}$	$4 \times 10^{19}$	0.92	$4 \times 10^{-7}$
78	GaAs	24	$9.5 \times 10^{19}$	$4 \times 10^{23}$	1	$5 \times 10^{-7}$
79	GaAs	29	$1.5 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{22}$	0.97	$6 \times 10^{-7}$
80	Si	10	$9 \times 10^{21}$	$4 \times 10^{22}$	0.75	$3 \times 10^{-7}$
81	Si	18	$8.5 \times 10^{22}$	$4 \times 10^{19}$	0.6	$4 \times 10^{-7}$
82	Si	24	$9.5 \times 10^{18}$	$4 \times 10^{20}$	0.42	$5 \times 10^{-7}$
83	Si	29	$1.5 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{20}$	0.45	$6 \times 10^{-7}$
84	Ge	36	$5 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{18}$	-2	$6 \times 10^{-7}$
85	Ge	33	$5.5 \times 10^{20}$	$9 \times 10^{20}$	-1.5	$1 \times 10^{-7}$
86	Ge	20	$6 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{21}$	-1.7	$2 \times 10^{-7}$
87	GaAs	29	$2 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{21}$	0.98	$6 \times 10^{-6}$
88	GaAs	30	$3 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{22}$	0.97	$3 \times 10^{-6}$
89	GaAs	31	$3 \times 10^{18}$	$6 \times 10^{20}$	0.79	$4 \times 10^{-6}$
90	GaAs	32	$3 \times 10^{21}$	$7 \times 10^{21}$	0.9	$5 \times 10^{-6}$
91	GaAs	35	$4 \times 10^{22}$	$7 \times 10^{22}$	1.1	$1 \times 10^{-7}$
92	Ge	37	$4 \times 10^{23}$	$7.5 \times 10^{21}$	-0.5	$2 \times 10^{-7}$
93	Ge	38	$4 \times 10^{20}$	$3.5 \times 10^{18}$	-0.8	$3 \times 10^{-7}$
94	Ge	39	$5 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{22}$	-0.9	$4 \times 10^{-7}$
95	Ge	40	$5 \times 10^{21}$	$8 \times 10^{17}$	-1	$5 \times 10^{-7}$
96	Si	24	$1 \times 10^{22}$	$5 \times 10^{21}$	0.6	$1 \times 10^{-6}$
97	Si	25	$1 \times 10^{23}$	$5 \times 10^{22}$	0.7	$2 \times 10^{-6}$
98	Si	26	$1 \times 10^{20}$	$5.5 \times 10^{18}$	0.4	$3 \times 10^{-6}$
99	Si	27	$2 \times 10^{22}$	$6 \times 10^{22}$	0.76	$4 \times 10^{-6}$

## 10. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАДАНИЯ

Вариант 100

Материал	$t^0C$	$N_{\phi}, 1/M^3$	$N_{\omega}, 1/M^3$	$U, B$	$S, M$	$L_p, MM$	$L_n, MM$
Si	20	$10^{22}$	$10^{23}$	-5B	$1 \times 10^{-6}$	0,02	0,04

### Задача 1.

1.1. Переводим заданное значение температуры в градусы Кельвина

$$T[K] = t^0C + 273 = 20 + 273 = 293K$$

1.2. Ширина запрещенной зоны при заданной температуре для Si

$$\Delta W = \beta - \alpha \cdot T = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 293 = 1,1218 \text{ эВ}$$

где  $\beta$  – экстраполированный член,  $\alpha$  – коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны.

1.3. Эффективная масса электрона

$$m_n = m_0 \cdot 1,084 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 1,084 = 9,87 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Эффективная масса дырки

$$m_p = m_0 \cdot 0,56 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 0,56 = 5,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$m_0$  - масса покоя электрона.

1.4. Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$ :

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n m_p)^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \left( \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{(6,626 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} (9,87 \cdot 10^{-31} \cdot 5,1 \cdot 10^{-31})^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \cdot (5,7878 \cdot 10^{46})^{3/2} (5,0337 \cdot 10^{-61})^{3/4} = 2 \cdot 1,39 \cdot 10^{70} \cdot 5,976 \cdot 10^{-46} = 1,664 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

1.5. Равновесные концентрации электронов и дырок  $n_i = p_i$ :

$$n_i = p_i = N \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W \cdot e}{2kT}\right) =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \exp\left(\frac{-1,1218 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}\right) = 1,661 \cdot 10^{25} e^{-22,2068} =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \cdot 2,268 \cdot 10^{-10} = 3,774 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

## Задача 2.

2.1. Концентрация основных носителей (электронов) в электронном полупроводнике

$$n_n = n_i + N_d = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{22} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$$

2.2. Концентрация неосновных носителей (дырок) в электронном полупроводнике

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{22}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{22}} = 1,424 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$$

2.3. Концентрация основных носителей (дырок) в дырочном полупроводнике

$$p_p = n_i + N_a = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{23} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$$

2.4. Концентрация неосновных носителей (электронов) в дырочном полупроводнике

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{23}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{23}} = 1,424 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$$

### Задача 3.

3.1. Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещённой зоны и, при условии  $W_c = 0$ , определяется выражением:

$$W_{Fi} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{1,1218}{2} - \frac{3 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{5,1 \cdot 10^{-31}}{9,87 \cdot 10^{-31}} =$$

$$0,5609 - 0,01894 \cdot \ln 0,516717 = 0,5609 + 0,01894 \cdot 0,66 = 0,5609 + 0,0125 =$$

$$= 0,5734 \text{ эВ}$$

3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике  $p$ -типа определяется выражением:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{1,1218}{2} + \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{23}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 + 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^7 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 17,0925 = 0,5609 + 0,43175 =$$

$$= 0,9926 \text{ эВ}$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике  $n$ -типа определяется выражением:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{1,1218}{2} - \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{22}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 - 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^6 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 14,7899 =$$

$$0,5609 - 0,3736 = 0,1873 \text{ эВ}$$

3.4. Энергетические диаграммы изображены на рис. 6 и 7.

**Задача 4.** Высоту потенциального барьера (контактную разность потенциалов) в идеальном электронно-дырочном переходе **в состоянии равновесия**, т. е. при отсутствии внешнего напряжения можно определить:

$$\varphi_{k0} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{22} \cdot 10^{23}}{(3,774 \cdot 10^{15})^2} =$$

$$0,02526 \cdot \ln 7,02 \cdot 10^{13} = 0,02526 \cdot 31,88 = 0,8053 \text{ В}$$

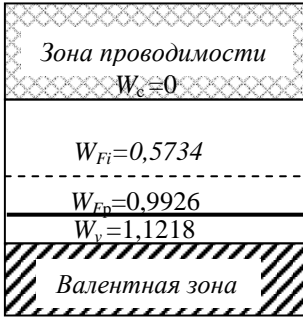


Рис. 6. Энергетическая диаграмма полупроводника *p*-типа.

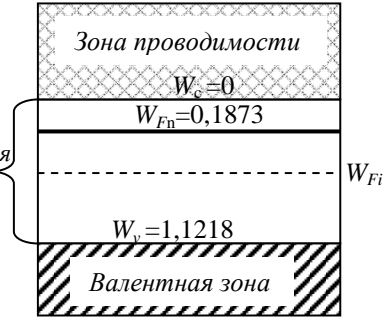


Рис. 7. Энергетическая диаграмма полупроводника *n*-типа.

### Задача 5

5.1. **Ширина** идеального электронно-дырочного **перехода** в состоянии равновесия  $\delta_0$  определяется выражением:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon \cdot \varphi_{k_0}}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 0,8052}{1,602 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{1}{10^{23}} + \frac{1}{10^{22}} \right)} =$$

$$= \sqrt{1,067 \cdot 10^9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-22}} = 3,426 \cdot 10^{-7} = 0,342 \text{ мкм}$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная **диэлектрическая проницаемость** полупроводника:  $\varepsilon_{Ge} = 16$ ,  $\varepsilon_{Si} = 12$ ,  $\varepsilon_{GaAs} = 13,1$ .

5.2. Размеры обедненных слоев *p*- и *n*- областей ( $\delta_{p0}$ ,  $\delta_{n0}$ ) в состоянии равновесия зависят от концентраций донорных и акцепторных примесей:

$$\delta_{p0} = \frac{N_d}{N_d + N_a} \delta_0 = \frac{10^{23}}{10^{23} + 10^{22}} 0,342 \cdot 10^{-6} = 0,3109 \text{ мкм};$$

$$\delta_{n0} = \frac{N_a}{N_d + N_a} \delta_0 = \frac{10^{22}}{10^{23} + 10^{22}} 0,342 \cdot 10^{-6} = 0,03109 \text{ мкм}.$$

$$\text{Проверяем } \delta_0 = \delta_{p0} + \delta_{n0} = 0,3109 + 0,03109 = 0,34199 \approx 0,342$$

5.3. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода, находящегося в состоянии равновесия изображена на рис.8.

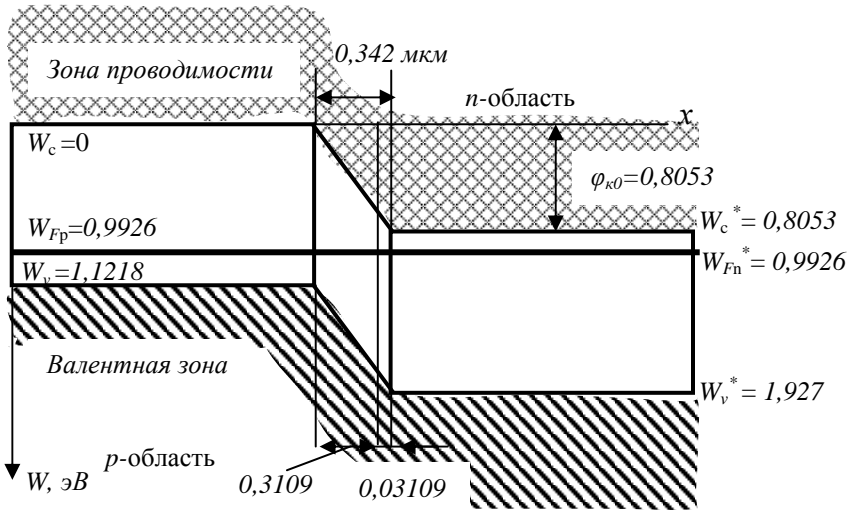


Рис.8

### Задача 6. Определение параметров перехода при подаче внешнего напряжения

6.1. При подаче внешнего обратного напряжения высота потенциального барьера в идеальном  $p$ - $n$ -переходе увеличивается:

$$\Delta\varphi = \varphi_{k0} - U = 0,8053 - (-5) = 5,8053 \text{ В}$$

Уровень Ферми в пределах  $p$ - $n$  перехода смещается на величину поданного фиксированного внешнего напряжения  $U$ .

6.2. При подаче внешнего обратного напряжения ширина электронно-дырочного перехода увеличивается:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 \cdot \Delta\varphi}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 5,8053}{1,602 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{1}{10^{23}} + \frac{1}{10^{22}} \right)} =$$

$$= \sqrt{7,697 \cdot 10^9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-22}} = 9,2 \cdot 10^{-7} = 0,92 \text{ мкм}$$

6.3. Размеры обедненных слоев  $p$ - и  $n$ - областей:

$$\delta_p = \frac{N_d}{N_d + N_a} \delta = \frac{10^{23}}{10^{23} + 10^{22}} 0,92 \cdot 10^{-6} = 0,8365 \text{ мкм};$$

$$\delta_n = \frac{N_a}{N_d + N_a} \delta = \frac{10^{22}}{10^{23} + 10^{22}} 0,92 \cdot 10^{-6} = 0,08365 \text{ мкм.}$$

Проверяем  $\delta = \delta_p + \delta_n = 0,8365 + 0,08365 = 0,92015 \approx 0,92$

6.4. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода при подаче внешнего обратного напряжения изображена на рис. 9.

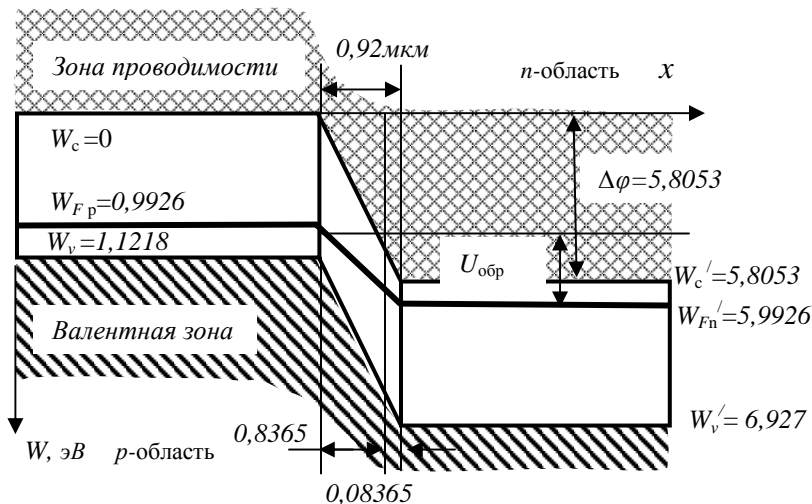


Рис.9

### Задача 7. Определение паразитных емкостей перехода

Суммарная ёмкость  $p$ - $n$ -перехода  $C$  складывается из барьерной ёмкости  $C_{\delta}$  и диффузионной ёмкости  $C_d$ . Диффузионная ёмкость оказывает влияние при прямом включении. Так как, в заданном варианте – включение обратное, то рассчитываем только барьерную ёмкость перехода

$$\begin{aligned}
 C_{\delta} &= S \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot e}{2} \frac{N_a N_d}{(N_a + N_d)} \frac{1}{\Delta \varphi}} = \\
 &= 1 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 5,8053} \frac{10^{22} \cdot 10^{23}}{(10^{22} + 10^{23})}} = \\
 &= 1 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,465 \cdot 10^{-30} \cdot 9,09 \cdot 10^{21}} = 1,15 \cdot 10^{-10} = 0,1154 \text{ нФ}.
 \end{aligned}$$

## Задача 8. Определение удельных сопротивлений и проводимостей $p$ и $n$ -областей, образующих электрический переход

8.1. Подвижности носителей заряда  $\mu_n$  и  $\mu_p$  зависят от температуры  $T$  и концентрации примесей  $N_d$  и  $N_a$  в областях, образующих электронно-дырочный переход. Здесь будем учитывать только температурное изменение подвижности носителей заряда:

Для кремния:

$$\mu_n = 0,14 \left( \frac{T}{300} \right)^{-3/2} = 0,14 \left( \frac{293}{300} \right)^{-3/2} = 0,145 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с});$$

$$\mu_p = 0,048 \left( \frac{T}{300} \right)^{-3/2} = 0,048 \left( \frac{293}{300} \right)^{-3/2} = 0,0497 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с}).$$

8.2. С учетом того, что концентрации основных носителей много больше концентрации неосновных, проводимости полупроводников можно рассчитать по приближенным формулам:

для электронного полупроводника

$$\sigma^n = N_d e \mu_n = 10^{22} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,145 = 232,29 \text{ См/м};$$

для дырочного полупроводника –

$$\sigma^p = N_a e \mu_p = 10^{23} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0497 = 796,68 \text{ См/м}.$$

8.3. Удельные объёмные сопротивления  $p$  и  $n$ - областей

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma^n} = \frac{1}{232,29} = 0,0043 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma^p} = \frac{1}{796,68} = 0,001255 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

## 9. Определение обратного тока в переходе

9.1. Коэффициенты диффузии зависят от температуры и подвижности носителей заряда:

$$D_p = \frac{kT\mu_p}{e} = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 0,0497}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 0,001255 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$D_n = \frac{kT\mu_n}{e} = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 0,145}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 0,003662 \text{ м}^2/\text{с}.$$

9.2. Обратный ток (ток насыщения или ток экстракции идеального  $p-n$  перехода):

$$I_0 = eS \left( \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) = 1,6020 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \left( \frac{0,001255 \cdot 1,424 \cdot 10^9}{0,02 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,003662 \cdot 1,424 \cdot 10^8}{0,04 \cdot 10^{-3}} \right) = 1,602 \cdot 10^{-25} (8,935 \cdot 10^{10} + 1,3037 \cdot 10^{10}) = 1,64 \cdot 10^{-14} \text{ A}$$

## 10. Определение силы тока и статического сопротивления при заданном внешнем напряжении

10.1. Сила тока в переходе  $I$  и приложенное к переходу внешнее напряжение  $U$  связаны уравнением вольт-амперной характеристики электрического перехода:

$$I = f(U) = I_0 \cdot \left( \exp \frac{U \cdot e}{kT} - 1 \right) \text{ или } U = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I}{I_0} + 1 \right)$$

При обратном включении  $I = I_0 = 1,64 \cdot 10^{-14} \text{ A}$

10.2. Статическое сопротивление  $p-n$ -перехода:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{1,64 \cdot 10^{-14}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ Ом}$$



## 11. ПОЯСНЕНИЯ К КАРТЕ ПРОГРАММИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ

**Диод** – электропреобразовательный прибор, содержащий, как правило, один электрический переход и два вывода для подключения к электрической цепи. В качестве выпрямляющего перехода в диодах может быть электронно–дырочный переход, гетеропереход или контакт между металлом и полупроводником (переход Шоттки (рис.VIII)).

В зависимости от назначения и выполняемых функций их делят на выпрямительные, импульсные, варикапы, стабилитроны, стабисторы и пр.

**Выпрямительный диод** — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный (однополярный) (рис.IX). Принцип работы выпрямительных диодов основан на использовании односторонней проводимости (вентильных свойств) электрического перехода. Они служат для преобразования переменного двухполярного тока в однополярный пульсирующий.

Наибольшую информацию об электрических свойствах выпрямительных диодов можно получить из ВАХ. На рис. 1 изображены ВАХ выпрямительных диодов, выполненных из *Ge* (кривые 1 и 6), *Si* (кривые 2 и 5), *GaAs* (кривые 3 и 4). Если сравнить прямые ветви трех диодов, изготовленных из разных материалов, с разной шириной запрещенной зоны, то у диода с большей  $\Delta W$  будет больше высота потенциального барьера. Следовательно, прямой ток через диод из материала с большей  $\Delta W$  будет меньше при том же прямом напряжении.

**С увеличением концентрации примесей** высота потенциального барьера будет увеличиваться, а значит, прямой ток при том же прямом напряжении будет меньше (рис.9 кривая 2).

**С увеличением температуры** прямое напряжение уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера *p-n*-перехода и с перераспределением носителей заряда по энергиям (рис. 9 кривая 1).

На рис. 14 приведена энергетическая диаграмма выпрямительного диода в состоянии равновесия, на рис. 15 – при прямом включении диода, на рис.16 – при обратном включении. На диаграммах обозначены точками СКМ – валентная зона, ADEF – зона проводимости, АСГК – запрещенная зона. Ширина *p-n*-перехода обозначена буквами DE, контактная разность потенциалов – FG, уровень Ферми – ВН.

**Различают 3 типа пробоя диодов: тепловой, лавинный (электрический) и туннельный.**

**Пробой германиевых диодов** имеет **тепловой** характер (рис.12). С ростом обратного напряжения рост обратного тока вызывает увеличе-

ние температуры, усиление процесса термогенерации, повышение концентрации неосновных носителей и еще более резкий рост обратного тока. Подводимая к переходу мощность  $P_{\text{под}}$  становится больше отводимой  $P_{\text{отв}}$ , в результате  $p$ - $n$ -переход разрушается и диод выходит из строя. Пробивное напряжение германиевых диодов уменьшается с увеличением температуры ( $T_2 > T_1$ ), а значения этого напряжения меньше пробивных напряжений кремниевых диодов.

**Пробой** кремниевых диодов имеет **лавинный** характер (рис. 10). Под действием высокого напряжения электроны ионизируют атомы. При этом число электронов растет лавинообразно, обратный ток резко возрастает. Поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры увеличивается ( $T_1 > T_2$ ). Лавинный пробой является обратимым, т.е. не разрушает  $p$ - $n$ -переход. В режиме электрического пробоя работают **стабилитроны** (рис.IV).

**Полупроводниковый стабилитрон** — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения.

Основные параметры обозначены точками на ВАХ (рис.2): напряжение стабилизации –  $D$ , соответствующий ему ток стабилизации –  $B$ , минимально допустимый ток стабилизации  $I_{\text{ст min}}$  –  $A$ , максимально допустимый ток стабилизации  $I_{\text{ст max}}$  – точкой  $C$ .

В низковольтных стабилитронах с напряжением стабилизации менее 6В, происходит **туннельный пробой** (рис.11), а пробивное напряжение при туннельном пробое уменьшается с увеличением температуры ( $\alpha_{\text{см}} < 0$ ) ( $T_2 > T_1$ ).

**Импульсный полупроводниковый диод** (рис. IX) — это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы. Импульсные диоды могут работать как от генератора тока, так и от генератора напряжений. В первом случае специфическим параметром импульсного диода является **время установления прямого напряжения** диода  $t_{\text{уст}}$ , равное интервалу времени от момента подачи импульса прямого тока на диод (при нулевом начальном напряжении смещения) до достижения заданного значения прямого напряжения на диоде (рис.3). Во втором случае – одним из основных параметров импульсного диода является **время восстановления обратного сопротивления**  $t_{\text{вос}}$ , равное интервалу времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения (рис.4).

*Паразитными параметрами p-n-перехода* являются барьерная и диффузионная емкости. **Барьерная** ёмкость является преобладающей при обратных и небольших положительных напряжениях. Барьерная ёмкость имеет высокую добротность, поскольку дифференциальное сопротивление велико. На практике барьерная ёмкость бывает от долей пкФ до сотен пкФ. Барьерная ёмкость не зависит от частоты, вплоть до  $10^{12}$  Гц. Барьерная ёмкость слабо увеличивается с ростом температуры из-за снижения высоты потенциального барьера (рис.13 кривая 1).

**Диффузионная** ёмкость обусловлена неравновесными (неосновными) носителями в базе. Является преобладающей при положительных напряжениях. Ёмкость может достигать значений в несколько мкФ (рис. 13 кривая 2).

**Варикап** (рис.V)— это полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости емкости от обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. На рис. 13 кривая 1 показывает зависимость емкости варикапа от обратного напряжения.

**Обращенным** называют диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении (рис. VII).

При концентрациях примесей в p- и n-областях диода, меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных выпрямительных диодах, можно получить диод, энергетическая диаграмма которого показана на рис. 17. Уровень Ферми при такой средней концентрации примесей расположен на потолке валентной зоны p-области (точка А) и на дне зоны проводимости n-области диода (точка С), т. е. потолок валентной зоны p-области и дно зоны проводимости n-области при нулевом смещении на диоде находятся на одной высоте по энергетической диаграмме.

Обращённые диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) — прямому включению (рис. 8). На рисунке изображены ВАХ обращённых диодов, выполненных из: *Ge* (кривые 2 и 3) и *GaSb* (кривые 1 и 4). ( $\Delta W_{GaSb}=0.72$  эВ,  $\Delta W_{Ge}=0.746$  эВ).

**Туннельный диод** (рис. VI) – полупроводниковый прибор на основе p-n-перехода, образованного вырожденными полупроводниками (концентрация примеси  $N \approx 10^{20}$  см<sup>-3</sup>).

Особенности туннельного диода: концентрация примеси высокая, что в сотни раз больше, чем в выпрямительных диодах; малая толщина перехода ( $\approx 0,01 \mu\text{м}$ ). В результате, даже при малых напряжениях напряженность электрического поля достигает величин порядка  $10^6$  В/см, а полупроводник становится **вырожденным**, то есть уровень Ферми заходит в  $p$ -области в валентную зону, а в  $n$ -области в зону проводимости. Энергетическая диаграмма туннельного диода в состоянии равновесия приведена на рис. 18.

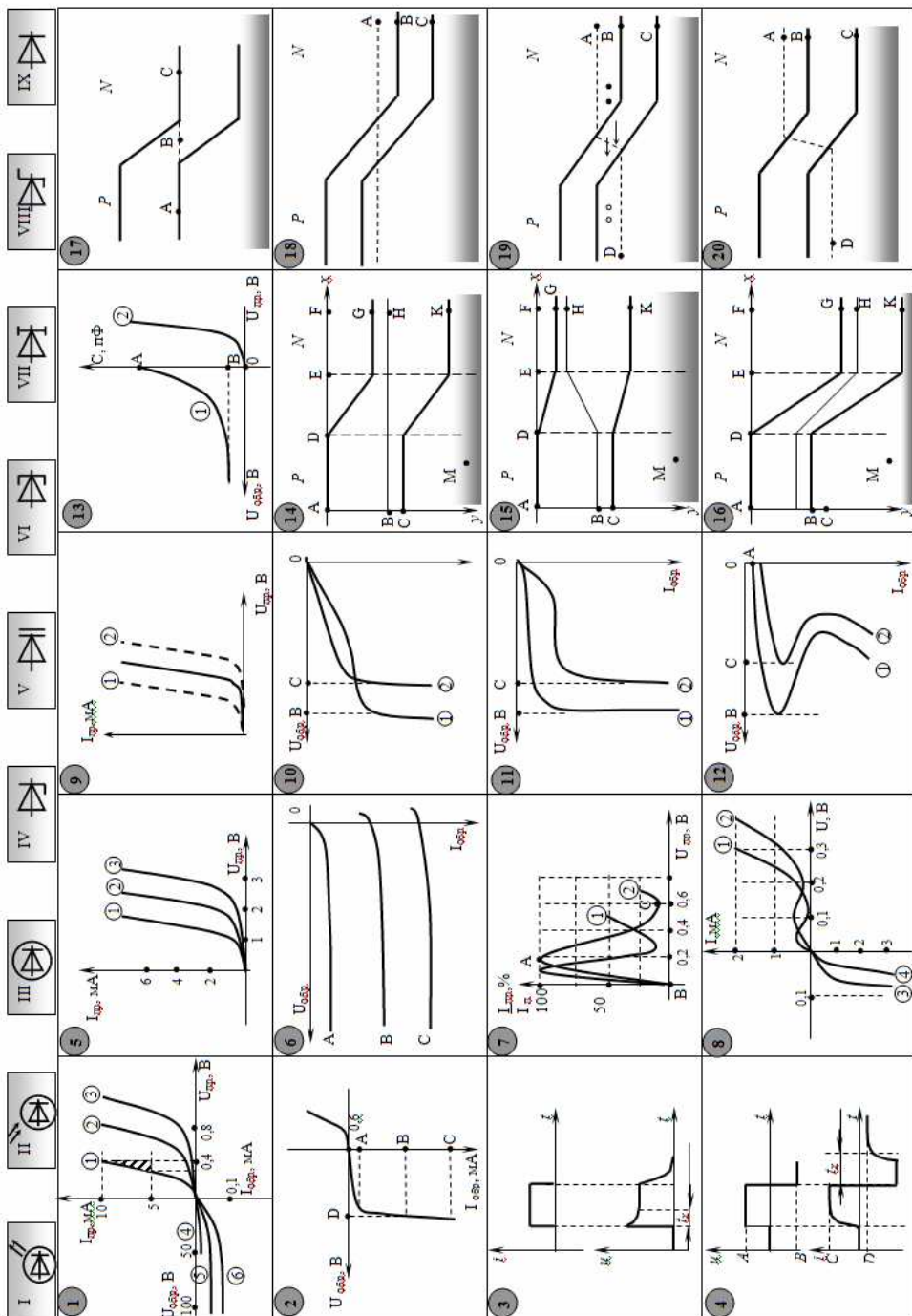
Если к переходу приложено прямое напряжение  $0 < U < U_{\text{п}}$ , потенциальный барьер (рис. 19) снижается, против занятых уровней  $n$ -области появляются разрешенные свободные уровни валентной зоны  $p$ -области. Появляется туннельный ток. При  $U = U_{\text{п}}$  (пиковое напряжение – точка А на рис.7) все уровни зоны проводимости  $n$ -области окажутся против свободных уровней валентной зоны, то есть прямой туннельный ток будет максимальным.

Если прямое напряжение станет больше  $U_{\text{п}}$ , барьер еще понизится (рис.20) и часть занятых уровней  $n$ -области окажется против запрещенной зоны  $p$ -области. Туннельный ток будет уменьшаться. При некотором  $U = U_{\text{в}}$  (напряжении впадины – точка С на рис.7) туннельный ток прекратится.

Туннельные диоды характеризуются специфическими параметрами: пиковый ток  $I_{\text{п}}$ , ток впадины  $I_{\text{в}}$ , отношение токов туннельного диода  $I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$ , напряжение пика  $U_{\text{п}}$ , напряжение впадины  $U_{\text{в}}$ . Их можно определить по ВАХ на рис.7. На этом рисунке приведены ВАХ диодов, выполненных из  $Ge$  (кривая 1) и  $GaAs$  (кривая 2) ( $\Delta W_{GaAs}=1.43$  эВ,  $\Delta W_{Ge}=0.746$  эВ).

Полупроводниковым прибором отображения информации является **светодиодающий диод** (СИД) (рис. I). Их изготавливают из широкозонных полупроводниковых материалов  $\Delta W > 1.7$  эВ. На рис. 5 изображены ВАХ светодиодов, выполненных из:  $GaAs$  (кривая 1),  $GaP$  (кривая 2),  $SiC$  (кривая 3) ( $\Delta W_{GaAs}=1.43$  эВ,  $\Delta W_{GaP}=2.26$  эВ,  $\Delta W_{SiC}=2.39$  эВ).

Полупроводниковым приемником излучения является **фотодиод** (рис. II). Его обратный ток зависит от освещенности. На рис.6 изображена ВАХ фотодиода. Кривая А соответствует затемненному состоянию (световой поток  $\Phi=0$ ). При освещении фотодиода обратный ток через него возрастает на величину, называемую фототоком. Кривая С соответствует большему световому потоку  $\Phi_c > \Phi_{\text{в}}$ .



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Соотношения между некоторыми единицами физических величин

$$\begin{aligned}1 \text{ А} &= 1 \text{ Кл/с} = 1 \text{ В/Ом} = 1 \text{ Вт/В}; \\1 \text{ В} &= 1 \text{ А} \cdot \text{Ом} = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ Вт/А}; \\1 \text{ Вт} &= 1 \text{ А} \cdot \text{В} = 1 \text{ Дж/с}; \\1 \text{ Дж} &= 1 \text{ Кл} \cdot \text{В} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ эВ}; \\1 \text{ Кл} &= 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж/В}; \\1 \text{ Ом} &= 1 \text{ В/А} = 1 \text{ См}^{-1}; \\1 \text{ См} &= 1 \text{ А/В} = 1 \text{ Ом}^{-1}; \\1 \text{ Ф} &= 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ с/Ом}; \\1 \text{ эВ} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.\end{aligned}$$

### Приложение 2

#### Некоторые физические и математические постоянные

Абсолютное значение заряда электрона	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Число $\pi$	$\pi = 3,1415926$
Масса покоя электрона	$m_0 = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$