

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

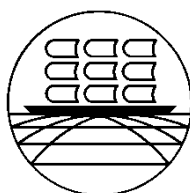
ВЛАСОВ А.Б.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Методические рекомендации и контрольные задания для самостоятельной
работы по курсам "Физические основы электроники",
"Введение в специальность"**

для курсантов специальности 26.05.07

"Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики"



Мурманск

2019

Власов А.Б. Физические основы электроники. Методические рекомендации и контрольные задания для самостоятельной работы по курсам "Физические основы электроники", "Введение в специальность" для специальности 26.05.07 Эксплуатациям судового электрооборудования и автоматики судов» – Мурманск, 2019. 20 с. - (ФГБОУ.ВО «МГТУ»).

Методические рекомендации и контрольные задания рассмотрены и одобрены кафедрой ЭОС

25 января 2019 г., протокол № 5.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КУРСУ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»
ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 26.05.07 ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУ-
ДОВАНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ**

Целью дисциплины: является подготовка обучающегося в соответствии с квалификационной характеристикой специалиста и рабочим учебным планом специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики».

Задачи изложения дисциплины:

-дать предварительные знания по полупроводниковым приборам (диодов, транзисторов, термисторов и других, которые наиболее широко используются в аналоговой и цифровой технике;

-овладение навыками в проведении эксперимента с полупроводниковыми приборами;

-выработка самостоятельной учебной деятельности;

-развитие интереса к дальнейшей познавательной деятельности;

-стремление к изучению и применению приборов;

В результате изучения дисциплины курсант должны знать:

Знать:

-требования Международной конвенции и Кодекса ПНДВ-78/95 к подготовке судовых инженеров – электромехаников в части электротехнических материалов, применяемых в устройствах судовой электроники и силовой преобразовательной техники;

-методы анализа свойств различных приборов;

- начальные методы расчета приборов аналоговой и цифровой электроники;

- параметры и характеристики полупроводниковых приборов.

Уметь:

- выполнять экспериментальные исследования приборов и определять их электрофизические параметры и характеристики;

- решать практические задачи по расчету и анализу устройств;

- производить измерение электрических величин;

- использовать справочную литературу.

- использовать принципы физического и инженерного подходов к оценке возможностей использования приборов,

Содержание разделов дисциплины: (таблица 4: 18 модулей), охватывающих: начальные сведения об элементной базе судовой электроники:

резисторы, диоды, транзисторы, тиристоры и другие.

Реализуемые компетенции:

В соответствии с Конвенцией ПДНВ:

Функция: АШ/6 (Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления на уровне эксплуатации; Техническое обслуживание и ремонт на уровне эксплуатации);

ФГОС ВПО: ОПК-2; ОПК-3; ПК-22

Процесс изучения дисциплины “ Физические основы электроники” направлен на формирование компетенций в соответствии ФГОС ВО, с Конвенцией ПДНВ, Примерной основной образовательной программы Федерального УМО в системе высшего образования по УГСН «Техника и технологии кораблестроения и водного транспорта», представленных в таблице по специальности 26.05.07 “Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики”.

Таблица 2. - Результаты обучения

№ п/п	Код и содержание компетенции	Соответствие Кодексу ПДНВ	Степень реализации компетенции	Этапы формирования компетенции (Индикаторы сформированности компетенций)
Общепрофессиональная компетенция				
1	ОПК-2. Способен применять естественнонаучные и общинженерные знания, аналитические методы в профессиональной деятельности	Таблица АШ/6 Наблюдение за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления	Компетенция реализуется полностью	ИД-1 _{ОПК-2} : Знает основные законы естественнонаучных дисциплин, связанные с профессиональной деятельностью ИД-2 _{ОПК-2} : Умеет применять основные законы естественнонаучных дисциплин, связанные в профессиональной деятельности ИД-3 _{ОПК-2} : Владеет навыками применения основных законов естественнонаучных дисциплин, связанных с профессиональной деятельностью
2	ОПК-3. Способен проводить измерения и наблюдения, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	Таблица АШ/6 Техническое обслуживание и ремонт электрического и электронного оборудования	Компетенция реализуется полностью	ИД-1 _{ОПК-3} : Знает способы измерений, записи и хранения результатов наблюдений, методы обработки и представления экспериментальных данных ИД-2 _{ОПК-3} : Умеет обрабатывать экспериментальные данные, интерпретировать и профессионально представлять полученные результаты ИД-3 _{ОПК-3} : Владеет навыками работы с измерительными приборами и инструментами
Тип задач производственной деятельности – Проектная				
3	ПК-22. Способен разработать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом физико-технических, механико-технологических, эстетических, эргономических, экологических и экономических требований	Таблица АШ/6 Техническое обслуживание и ремонт электрических, электронных систем и систем управления палубными механизмами и грузоподъемным оборудованием	Компетенция реализуется полностью	ИД-1 _{ПК-22} Умеет разрабатывать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом физико-технических требований; ИД-2 _{ПК-22} Умеет разрабатывать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом механико-технологических требований; ИД-3 _{ПК-22} Умеет разрабатывать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом эстетических, эргономических требований;

Таблица 3 - Распределение учебного времени дисциплины
Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единиц, 72 часа.

Вид учебной нагрузки	Очная				Заочная			
	Семестр /Курс			Всего часов	Семестр/Курс			Всего часов
	3/2				4/2			
Лекции	18			18	6			6
Практические работы								
Лабораторные работы	18			18	6			6
Курсовая работа								
Самостоятельная работа	36			36	56			56
Подготовка к промежуточной аттестации					4			4
Всего часов по дисциплине	72			72	72			72

Таблица- Содержание разделов дисциплины (модуля), виды работы

№	Содержание разделов (модулей), тем дисциплины	Количество часов, выделяемых на виды учебной работы по формам обучения												
		Очная				Очно-заочная				Заочная				
		Л	ЛР	ПР	СР	Л	ЛР	ПР	СР	Л	ЛР	ПР	СР	
Семестр 5														
1.	Модуль 1 Общие сведения о полупроводниковых материалах. Собственные и примесные полупроводники. Связь между концентрациями основных и неосновных носителей заряда. Закон действующих масс,	2			4						0,5	0,5		6
2.	Модуль 2 Понятие о зонной теории твердого тела, собственная и примесная проводимость полупроводников, фотопроводимость, фотоэлектрические преобразователи	2	2		4						0,5	0,5		6
3.	Модуль 3 Связь проводимости с концентрацией и подвижностью носителей заряда. Зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры и концентрации примесей.	2	4		4									6
4.	Модуль 4 Гальваномагнитные эффекты. Эффект	2			4						0,5	0,5		6

	Холла. Полупроводниковые холодильники и их применение												
5.	Модуль 5 Образование и свойства электронно-дырочного перехода. Ширина области объемного заряда. Диффузионная и барьерная емкость перехода, ее связь с различными параметрами. Варикапы, их строение, обозначение, применение.	2			4					1	1		6
6.	Модуль 6 Типы диодов. Прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики. Виды пробоя р-п-перехода. Использование явления пробоя в различных полупроводниковых приборах. Типы диодов. Стабилитроны, их применение в схемах.	2	4		4					1	1		6
7.	Модуль 7 Биполярные транзисторы. Структура, режимы и схемы включения. Статические характеристики в схеме ОБ, ОЭ, ОК.	2	4		4					1	1		6
8.	Модуль 8 Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом, изолированным затвором, и их режимы работы.	2	4		4					1	1		6
9.	Модуль 9 Тиристоры: строение, свойства, характеристики. IGBT -транзисторы	2			4					0,5	0,5		8
	Итого	18	18		36					6	6		56

I. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов А.Б. Электроника. Элементы электронных схем (часть 1). - Мурманск, МГТУ, 2009, -157 с.
2. Власов А.Б. Электроника. Основные аналоговые элементы и узлы электронной аппаратуры (часть 2). - Мурманск: МГТУ, 2008, -255 с.
3. Власов А.Б. Электроника. Основные цифровые элементы и узлы электронной аппаратуры (часть 3). - Мурманск: МГТУ, 2008, -207 с.
4. Власов А.Б., Черкесова З.Н. Задачи и методы их решения по курсу "Электротехника и электроника" (задачник) Учебное пособие по дисциплинам "Электротехника и электроника", "Общая электротехника и электроника" для технических специальностей. - Мурманск: МГТУ, 2015, -137 с.
5. Власов, А.Б. Виртуальный лабораторный практикум "Электроника", Учеб. пособие по дисциплинам "Судовая электроника и силовая преобразовательная ка", "Практическая схемотехника": Учеб. пособие для технических специальностей / А.Б. Власов. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2010. 137с.
6. Власов А.Б. Физические основы электроники: Электрофизические методы исследования полупроводников и полупроводниковых приборов. – Мурманск: МГТУ, 2013. – 228 с.
7. Власов А.Б., Черкесова З.Н. Лабораторный практикум "Электротехника" по курсам "Теоретические основы электротехники", "Электротехника и электроника" (практикум) Учебное пособие МГТУ для всех форм обучения. - Мурманск: МГТУ, 2010, -137 с
8. Власов А.Б. Силовая преобразовательная техника. Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», "Электротехнические комплексы и системы». Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. Электронный вариант.

9. Власов А.Б. Расчет управляемого полупроводникового выпрямителя. Методические указания и контрольные задания к курсовой работе по дисциплине «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» для специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики». Мурманск: Изд-во МГТУ. 2019. Электронный вариант.

10. Власов А.Б., Кучеренко В.В., Черкесова З.Н. Силовая преобразовательная техника. Методические указания к лабораторному практикуму «Силовая преобразовательная техника» по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», «Электротехнические комплексы и системы», «Электромагнитная совместимость» – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. Электронный вариант.

11. Власов, А.Б., Капустин А.Н., Мухалев В.А. Лабораторный практикум «Силовая преобразовательная техника» по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», «Практическая схемотехника», «Силовые полупроводниковые преобразователи», «Электротехника, электроника и схемотехника» для технических специальностей / А.Б. Власов, А.Н. Капустин, В.А. Мухалев. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2017. – 170 с.

12. Власов А.Б. Задачи аналоговой и цифровой электронике. Методические рекомендации и контрольные задания по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника» для специальности 26.05.07 Эксплуатациям судового электрооборудования и автоматики судов. Мурманск: Изд-во МГТУ . 2019. Электронный вариант.

13. Власов А.Б. Задачи по силовой электронике. Методические рекомендации и контрольные задания по курсам «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», «Электротехнические комплексы и системы. Мурманск: Изд-во МГТУ. 2019. Электронный вариант.

14. Власов А.Б. Импульсные схемы на ЛЭ (файл)

15. *Дополнительные методические материалы по курсу (файлы в лаборатории).*

ЗАДАНИЕ НА СЕМЕСТР

РАЗДЕЛ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
(Осенний семестр: лекции 18 час; лаб. 18 час. Дифзачет)

В период семестра делаются РГР:

- 1) расчетно-графическая работа:
 - литература [4] , задача 5.1.
 - литература [5] - виртуальные работы №1, №2

Выполнение лабораторных работ:

литература [6]:
Лабораторная работа № 3.1 "Исследование полупроводниковых диодов"
Лабораторная работа № 3.2 "Исследование полупроводниковых стабилитронов"
Лабораторная работа №3.3 "Исследование светодиодов"
Лабораторная работа №4.1 "Статические характеристики биполярного транзистора"
Лабораторная работа № 5.1 "Статические характеристики полевого транзистора"
литература [7], [10], [11]:
Лабораторная работа № 12 "Исследование свойств управляемого одноперационного тиристора"
Лабораторная работа №13 "Анализ работы силового IGBT транзистора"

Подготовка к зачету:

- 1) *Отчетные материалы по РГР*
- 2) *Конспекты лекций и самостоятельной работы*

- 3) *Ответы на задачи по аналоговой и цифровой электронике.*
Литература: [12].

С отдельными примерами решения тех или иных задач (см. приложение) можно ознакомиться в литературе, в лаборатории кафедры, или на консультации.

СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Материалы курса в основном изложены в соответствующих темах методических пособий. Дополнительные сведения при необходимости можно найти в других рекомендуемых источниках.

В приводимых ниже примерах решения задач используются соотношения, таблицы, параметры, представленные в литературе.

ЧАСТЬ I. ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ТЕМА 1 . ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниковые материалы, их характеристики. Материалы IV группы, $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, элементы V группы и их аналоги, соединения элементов VI группы, органические полупроводники.

Элементы зонной теории металлов и полупроводников. Квантование электронов в изолированных атомах. Классификация кристаллов по типам связей.

Кристаллические решетки. Дефекты. Колебания кристаллической решетки. Фононы.

Формирование зонных диаграмм при объединении атомов в кристаллы. Заполнение энергетических зон электронами. Особенности образования свободных носителей заряда в металлах и полупроводниках.

Методические рекомендации

В результате изучения темы студенты (курсанты) должны знать простейшие свойства кристаллических решеток.

При анализе данной темы необходимо обратить внимание на отличие энергетических диаграмм, описывающих поведение электронов в изолированных атомах, от зонных диаграмм, описывающих поведение носителей заряда в кристаллических структурах. Энергетические диаграммы позволяют наглядно описать поведение носителей в процессах электропроводности, качественно объяснить работу полупроводниковых приборов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды связи реализуются в материалах?
2. Какие основные типы простых решеток вам известны?
3. Какие основные виды дефектов присутствуют в кристаллах?

ТЕМА 2. ОБРАЗОВАНИЕ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Собственные и примесные полупроводники. Донорная и акцепторная примесь.

Концентрация носителей заряда в металлах и полупроводниках.

Зонная теория ее основные понятия: зона проводимости, запрещенная зона, валентная зона, свободные электроны и дырки, их генерация и рекомбинация.

Методические рекомендации

При изучении данной темы основное внимание необходимо уделить таким вопросам как образование носителей заряда в полупроводниках, закон действующих масс, позволяющий определять концентрацию носителей в различных полупроводниках.

Ширина запрещенной зоны различных материалов

Полупроводники		Диэлектрики	
Материал	ΔE_z , эВ	Материал	ΔE_z , эВ
Германий Ge	0,67	Алмаз	5.2
Кремний Si	1,1	Окись алюминия	7,0

Арсенид галлия GaAs	1,43	Нитрид бора	4,6
Специальные окислы	0,1...0,3		

Примечание: значение ширины запрещенной зоны в различных источниках могут отличаться, т.к. измеряются различными методами.

Особо следует подчеркнуть, что при температурах выше температуры ионизации примесей, в частности при $T=300$ К, все примеси ионизированы и концентрация основных носителей полностью определяется концентрацией примесей. При этом концентрация неосновных носителей рассчитывается с учетом закона действующих масс.

Вопросы для самопроверки

1. Как зависит концентрация свободных носителей заряда в собственных и примесных полупроводниках от температуры? Что характеризуют температуры истощения примесей и перехода к собственной проводимости? Какая из них больше?

2. Германиевый и кремниевый образцы имеют одинаковое количество донорных центров, например 10^{21} м^{-3} . Температура равна 300 К. В каком образце больше неосновных носителей?

Примеры решения задач по теме 2

Задача 1. Определить, чему равна ширина запрещенной зоны кремния при температуре 400 К, если коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $\beta = -2.84 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$?

Решение. Ширина запрещенной зоны зависит от температуры. Так, например, в германии и кремнии она изменяется по закону

$$\Delta E_3(T) = \Delta E_3(300) + \beta \cdot T,$$

где T - температура, К; $\Delta E_3(300)$ - табличное значение ширины запрещенной зоны для 300 К.

Принимая для кремния $\Delta E_3(300) = 1,1 \text{ эВ}$ при 400 К имеем

$$\Delta E_3(400) = 1,1 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 400 = 0,984 \text{ эВ}.$$

Таким образом, при увеличении температуры ширина запрещенной зоны уменьшается.

Задача 2. Определить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T = 300$ К. В лекциях (таблицах) приведены параметры материала.

Решение. Собственная концентрация носителей определяется известными соотношениями. Постоянные N_c и N_v равны:

Последние выражения весьма удобны для вычисления значений N_c , N_v при различных температурах и могут быть использованы в РГЗ.

Согласно выражению для собственного полупроводника при температуре 300 К имеем

$$n_i = 10^{25} \cdot (2,69 \cdot 1,05)^{1/2} \cdot \exp(-1,11 / (2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300)) = 8,13 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 3. Определить концентрацию основных и неосновных носителей заряда в примесном кремнии при концентрации примесей мышьяка $N_{\text{пр}} = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и температуре 300 К.

Решение. При решении данной задачи следует знать, что температура $T = 300$ К гораздо выше температуры ионизации примесей T_s , рассчитываемой по известному соотношению. С учетом этого при $T = 300$ К все примеси уже ионизированы. В этом случае для данного диапазона температур следует использовать соотношение, вытекающее из физического смысла:

$$n_n = N_{\text{пр}} = 10^{20} \text{ м}^{-3},$$

поскольку каждый атом примеси при ионизации дает один электрон.

Для определения концентрации неосновных носителей целесообразно использовать закон действующих масс, определяемый соотношением:

$$n(T) \cdot p(T) = n_i^2(T).$$

Рассуждение должно строиться следующим образом. Если бы материал (кремний) был собственным, то концентрация собственных носителей была бы равна $8,13 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ (см. задачу 2). Следовательно, концентрация неосновных носителей при температуре 300 К равна

$$p_n(300) = (8,13 \cdot 10^{15})^2 / 10^{20} = 6,11 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}.$$

Очевидно, что концентрация неосновных носителей по мере возрастания температуры (в некоторых пределах до T_i) увеличивается.

ТЕМА 3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Связь проводимости с концентрацией и подвижностью носителей заряда. Дифференциальный закон Ома. Зависимость подвижности носителей заряда в металлах и полупроводниках от температуры и концентрации примесей. Зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры и концентрации примесей.

Примеры решения задач по теме 3.

Задача 4. Вычислить отношение полного тока через полупроводник к току, обусловленному дырочной составляющей: а) в собственном германии; б) в германии р-типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Принять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Решение. С учетом дифференциального закона Ома можно записать, что отношение полного тока к его дырочной составляющей равно

$$\beta_p = I/I_p = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) / (e \cdot p \cdot \mu_p) = 1 + (n \cdot \mu_n / p \cdot \mu_p),$$

где n , p - концентрации электронов и дырок соответственно.

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$, т. е.

$$\beta_{ip} = 1 + 0,39/0,19 = 3,05.$$

В полупроводнике р-типа необходимо оценить соотношение между концентрациями основных и неосновных носителей следующим образом:

$$\rho = 1/\gamma = (en\mu_n + ep\mu_p)^{-1} = [e(n_i^2/p)\mu_n + ep\mu_p]^{-1},$$

откуда

$$p^2 - 6,58 \cdot 10^{20} p + 9,5 \cdot 10^{38} = 0.$$

Решение последнего уравнения относительно концентрации дырок и последующее использование закона действующих масс для определения концентрации неосновных носителей дает

$$p_p \approx 6,57 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \gg n_p \approx 6,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Зная данные значения концентраций, находим

$$\beta_p = 1 + 6,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,39 / 6,57 \cdot 10^{20} \cdot 0,19 = 1,002.$$

Тема 4. Полупроводниковые радиокомпоненты

Терморезисторы, фоторезисторы. Диоды Ганна. Варисторы

Гальваноманнитные эффекты. Эффект Холла.

Современные проблемы нанoeлектроники.

Методические рекомендации

При изучении данной темы основное внимание необходимо уделить зависимости проводимости от различных факторов, в частности, от подвижности и концентрации носителей заряда в металлах и полупроводниках, изучить строение, марки, свойства и применение полупроводниковых приборов, свойства которых основаны на изменении проводимости от различных факторов.

Вопросы для самопроверки

1. Как изменяется проводимость металлов при возрастании температуры?
2. Как изменяется проводимость собственных и примесных полупроводников от температуры?
3. Можно ли из полупроводниковых материалов изготовить термисторы, позисторы и какие условия для этого необходимо выполнить?
4. В чем суть эффекта Ганна? Опишите основные факторы, приводящие к возникновению высокочастотных колебаний.
5. Где применяются гальваномагнитные эффекты?
6. Какие перспективы наноэлектроники для создания новых полупроводниковых приборов

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Пояснительная записка

1.1. Выбор варианта

Выбор варианта осуществляется для заочников по последней цифре шифра, например, цифра **5** означает вариант **5**; цифры, оканчивающиеся на **0**, например, **0, 10, 20, ...** — вариант **10**, и т.д.

Для курсантов дневной формы обучения вариант определяется по номеру фамилии в журнале преподавателя. Если фамилия курсанта записана под номером **Z**, большим 10, то вариант определяется как **(Z — 10)**.

1.2. Выбор контрольных работ

Студенты (курсанты) обучения *нечетных групп* выбирают в качестве материалов: **1. Si; 2. Ge**; студенты (курсанты) *четных групп выбирают: 1. Ge 2. Si*. Номера примесей, указанные в табл. 1, не изменяются.

У студентов заочной формы обучения вариант соответствует последней цифре зачетки, в качестве материалов выбирают: **1. Si; 2. Ge**. Номера примесей указаны в табл. 1 .

Как правило, необходимо сделать расчет для материалов **1** и **2 одновременно**. Если по условию задачи предполагается выбор материала (имеется слово “или”), то при решении индекс “**1**” соответствует нечетному значению **Z**, а индекс “**2**” - четному значению **Z**.

По окончании расчета результаты представляются в виде итоговой таблицы с пунктами, соответствующими номерам заданий:

Пункт	1.1.	1.2								<i>N</i>
Ответ (в СИ)										

При ответе на задание контрольной работы необходимо:

- 1) написать полностью вопрос задачи : **общие и частный**.
- 2) дать краткие, но аргументированные ответы сначала на общий вопрос, а затем на частный вопрос конкретной задачи.

2. Требования к оформлению контрольных работ

Контрольные работы письменно выполняются в тетради; для замечаний рецензента оставляется место в конце каждого пункта или на полях. В случае неправильных ответов и замечаний преподавателя исправления делаются в той же тетради с указанием исправленных пунктов.

В начале каждой контрольной приводится перечень всех параметров и условия конкретного варианта с номером **Z**. При обнаружении неправильного выбора варианта контрольная работа не проверяется.

Необходимые постоянные или недостающие параметры могут быть взяты из справочных источников с указанием ссылок.

Формулы при необходимости выводятся самостоятельно или берутся из рекомендуемой литературы. Расчеты приводятся полностью с используемыми числовыми данными; ответ без числовых данных не допускается, и в окончательной форме записывается с точностью до 3-4 значащих цифр.

Для каждой физической величины приводятся единицы измерения системе СИ.

Каждый пункт расчета нумеруется. В тексте необходимо писать задание данного пункта, например: “*Рассчитываем ...*”. В последующих задачах РГЗ используют данные предыдущих расчетов, при этом записывают: “*Из данных пункта № ... следует ...*”.

Графический материал оформляется в соответствии со стандартными требованиями, масштаб выбирается самостоятельно. В том случае, когда предлагается качественный анализ, на осях масштаб, как правило, не указывается. Приводится краткое письменное объяснение графической зависимости и ее характерных точек.

Изучение дисциплины заканчивается установленной формой контроля, к которой необходимо предварительно выполнить и защитить контрольные и лабораторные работы.

Распечатки и машинное оформление работы не допускаются.

Таблица 1.

Исходные данные для выполнения контрольной

Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Общее	$Si : \Delta E_3 = 1.11 \text{ эВ при } 300 \text{ К; } \epsilon = 12$ $Ge : \Delta E_3 = 0.72 \text{ эВ при } 300 \text{ К; } \epsilon = 16$									
T, К	300	305	310	315	320	325	330	335	340	345
T _x , К	200	250	255	260	265	270	275	280	285	290
Примесь 1	As	P	Sb	As	P	Sb	As	P	Sb	As
Примесь 2	In	B	Al	In	B	Al	In	B	Al	In
N _{np1} , М ⁻³	10 ²⁰	10 ²³	10 ²¹	10 ²⁴	10 ²²	10 ²³	10 ²¹	10 ²⁴	10 ²²	10 ²³
N _{np2} , М ⁻³	10 ²²	10 ²⁰	10 ²³	10 ²²	10 ²⁴	10 ²⁰	10 ²³	10 ²²	10 ²⁴	10 ²¹
S, мм ²	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
j, А/м ²	10 ⁴									
μ, м ² /(В·с)	Значения выбираются по графикам μ(N _{np}) (рис. 1, 2), с учетом влияния температуры: $\mu(T) = \mu(300) \cdot (T/300)^{-3/2}$.									

Таблица 2

Контрольная работа

Номер варианта	Номера задач										
1	1	11	21	31	41	51	61	69	76	79	89
2	2	12	22	32	42	52	62	70	77	80	90
3	3	13	23	33	43	53	63	71	78	81	91
4	4	14	24	34	44	54	64	72	77	82	92
5	5	15	25	35	45	55	65	73	76	83	93
6	6	16	26	36	46	56	66	74	77	84	94
7	7	17	27	37	47	57	67	75	78	85	95
8	8	18	28	38	48	58	68	74	77	86	96
9	9	19	29	39	49	59	67	73	76	87	95
10	10	20	30	40	50	60	66	72	77	88	94

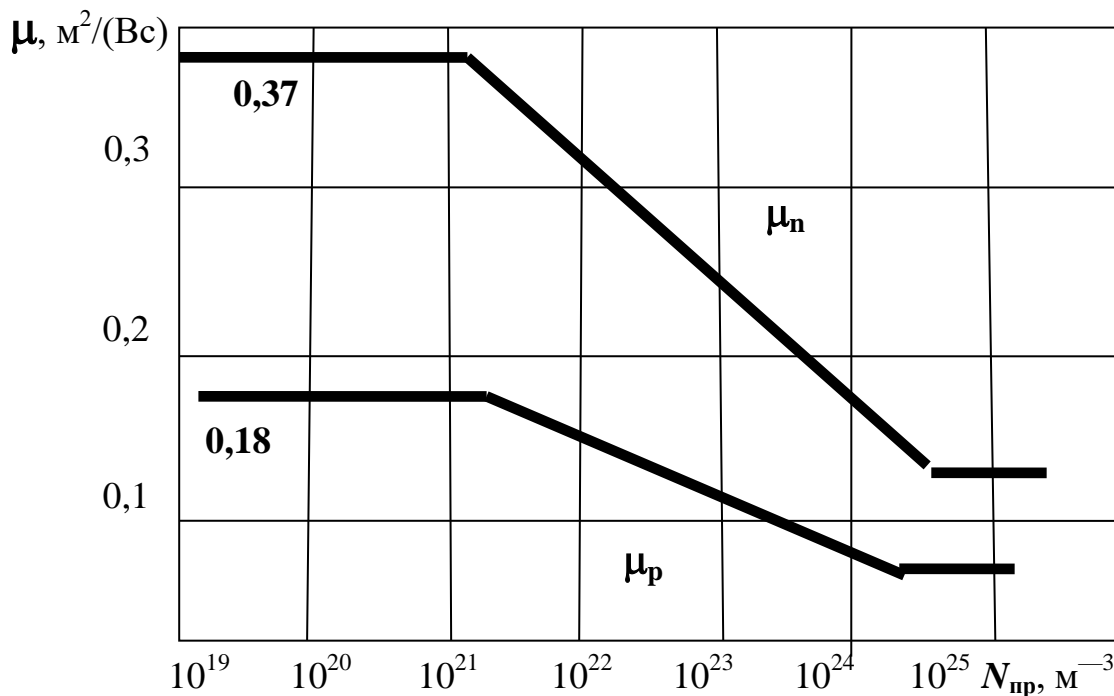


Рис.1. Зависимость подвижности электронов и дырок в германии от концентрации примесей (при 300 К)

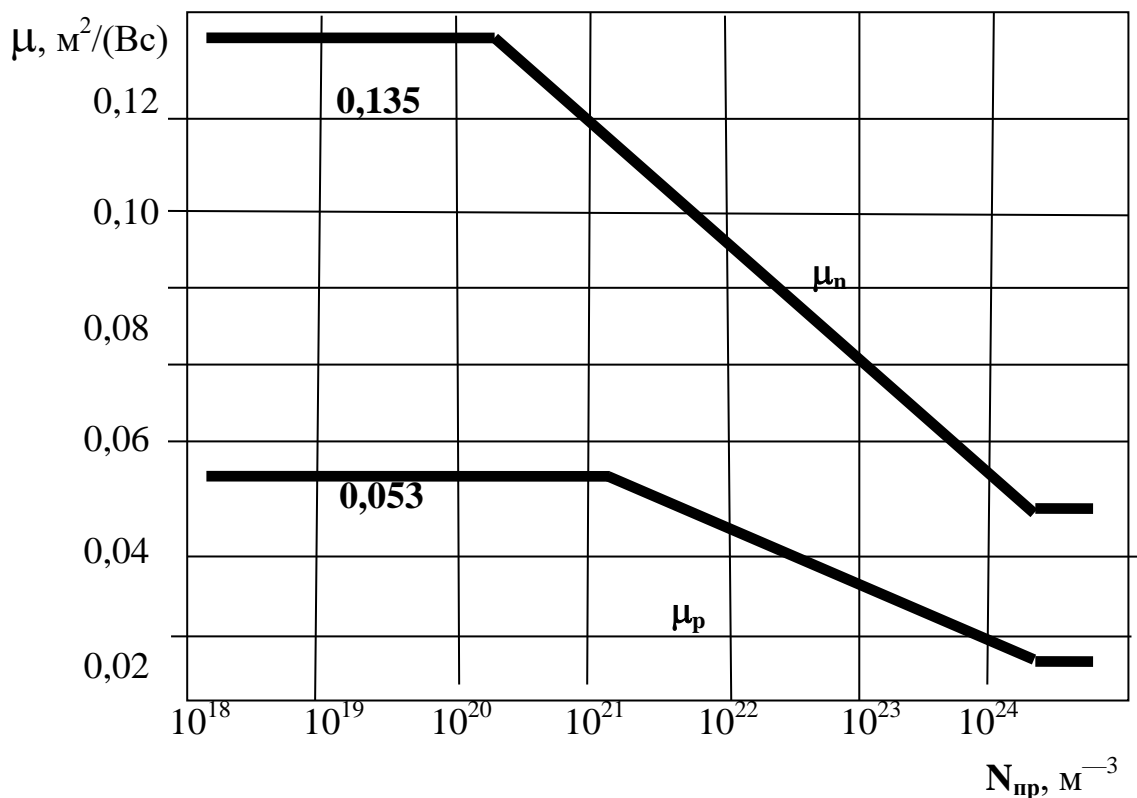


Рис. 2. Зависимость подвижности электронов и дырок в кремнии от концентрации примесей (при 300 К)

Содержание контрольной работы

Задачи 1-5. Приведите классификацию материалов по проводимости: металлы, полупроводники и диэлектрики. Назовите характерные группы полупроводников: элементы IV группы, алмазоподобные полупроводники, $A^{II}B^{IV}$, элементы VI, V групп и их аналоги, $A^{IV}B^{VI}$, магнитные и органические полупроводники.

Нарисуйте зонную диаграмму собственных полупроводников: германия и кремния. Что означают понятия: зона проводимости, запрещенная зона, валентная зона? Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости".

1. Рассчитайте концентрацию собственных носителей в германии и кремнии при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n_i(1/T)$.

2. То же при $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. 3. То же при $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. То же при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 5. То же при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задачи 6-10. Нарисуйте зонную диаграмму собственных полупроводников: германия и кремния. Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости".

Во сколько раз отличаются концентрации собственных носителей в германии и кремнии при 300 K . Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n_i(1/T)$.

7. То же при $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. 8. То же при $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. То же при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 10. То же при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задачи 11-16. В кремний введена примесь мышьяка (N_d - концентрация примесей). Изобразите схематически кристаллическую решетку с примесью и нарисуйте зонную диаграмму этого материала. Объясните механизм образования собственных и примесных носителей. Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости, электрон 3 - на уровне примесного центра".

Определите значения температуры истощения примесей T_s и перехода к собственной проводимости T_i . Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n(1/T)$ с учетом указанных температур.

- 11.** $N_d = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. **12.** $N_d = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. **13.** $N_d = 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
14. $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$. **15.** $N_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. **16.** $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Задачи 17-22. В кремний введена примесь индия (N_A - концентрация примесей). Изобразите схематически изображение кристаллическую решетку с примесью и нарисуйте зонную диаграмму этого материала. Объясните механизм образования собственных и примесных носителей с вероятностной точки зрения. Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости, электрон 3 - на уровне примесного центра".

Определите температуры истощения примесей T_s и перехода к собственной проводимости T_i . Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n(1/T)$ с учетом указанных температур.

- 17.** $N_A = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. **18.** $N_A = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. **19.** $N_A = 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
20. $N_A = 10^{20} \text{ м}^{-3}$. **21.** $N_A = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. **22.** $N_A = 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Задачи 23-28. В германий введена примесь мышьяка (N_d - концентрация примесей). Изобразите схематически кристаллическую решетку с примесью и нарисуйте зонную диаграмму этого материала. Объясните механизм образования собственных и примесных носителей с вероятностной точки зрения. Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости, электрон 3 - на уровне примесного центра".

Определите температуры истощения примесей T_s и перехода к собственной проводимости T_i . Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n(1/T)$ с учетом указанных температур.

- 23.** $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$. **24.** $N_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. **25.** $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$
26. $N_d = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. **27.** $N_d = 10^{24} \text{ м}^{-3}$. **28.** $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Задачи 29-34. В германий введена примесь бора (N_A - концентрация примесей). Изобразите схематически кристаллическую решетку с примесью и нарисуйте зонную диаграмму этого материала. Объясните механизм образования собственных и примесных носителей с вероятностной точки зрения. Где реально находятся электроны, если в терминах зонной теории говорится: "Электрон 1 находится в валентной зоне, электрон 2 - в зоне проводимости, электрон 3 - на уровне примесного центра".

Определите температуры истощения примесей T_s и перехода к собственной проводимости T_i . Нарисуйте и объясните зависимость $\ln n(1/T)$ с учетом указанных температур.

29. $N_A = 10^{20} \text{ м}^{-3}$. **30.** $N_A = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. **31.** $N_A = 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

32. $N_A = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. **33.** $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$. **34.** $N_A = 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Задачи 35 - 42. Сформулируйте закон действующих масс. Учитывая величины T_s и T_i , определите концентрацию основных и неосновных носителей в материале при температуре T и концентрации примесей N . Все примеси полностью ионизированы. Сравните по величине значения концентраций в германии и кремнии.

35. Германий: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

36. Германий: $N = 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

37. Германий: $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

38. Германий: $N = 10^{23} \text{ м}^{-3}$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{23} \text{ м}^{-3}$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

39. Германий: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

40. Германий: $N = 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

41. Германий: $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

42. Германий: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;

кремний: $N = 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задачи 43-52. Сформулируйте дифференциальный закон Ома, опишите связь между проводимостью, концентрацией и подвижностью. Учитывая величины T_s и T_i , определите и сравните по величине значения проводимости германия и кремния. Значения подвижности носителей в **Ge**: $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; в **Si**: $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

43. Данные задачи 35.

44. Данные задачи 36.

45. Данные задачи 37.

46. Данные задачи 38.

47. Данные задачи 39.

48. Данные задачи 40.

49. Данные задачи 41.

50. Данные задачи 42.

51. Данные задачи 38.

52. Данные задачи 35.

Задачи 53-59. Опишите метод определения типа носителей заряда с помощью термозонда (рис. 3). Определите тип электропроводности материала, основных и неосновных носителей. Нарисуйте зонную диаграмму данного материала. Какие примеси могут быть использованы?

53. Германий. Стрелка вольтметра отклонилась вправо.

54. Кремний. Стрелка вольтметра отклонилась вправо.

55. Германий. Стрелка вольтметра отклонилась влево.

56. Кремний. Стрелка вольтметра отклонилась влево.

57. Арсенид галлия. Стрелка вольтметра отклонилась влево.

58. Арсенид галлия. Стрелка вольтметра отклонилась вправо.

59. Селен. Стрелка вольтметра отклонилась влево.

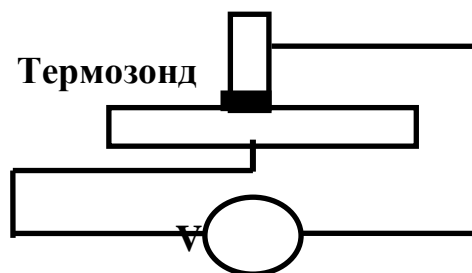


Рис. 3

Задачи 60-68. Опишите эффект и метод Холла для определения типа носителей, концентрации и подвижности носителей. Определите тип электропроводности материала, основных и неосновных носителей. Нарисуйте зонную диаграмму данного материала. Какие примеси могут быть использованы?

60. Германий. Ток направлен по оси X , индукция магнитного поля - по оси Y . Стрелка прибора отклонилась вправо.

61. Кремний. Ток направлен по оси $-X$, индукция магнитного поля - по оси Y . Стрелка прибора отклонилась вправо.

62. Германий. Ток направлен по оси $+X$, индукция магнитного поля - по оси Y . Стрелка прибора отклонилась вправо.

63. Германий. Ток направлен по оси $-X$, индукция магнитного поля - по оси $-Y$. Стрелка прибора отклонилась влево.

64. Кремний. Ток направлен по оси $-X$, индукция магнитного поля - по оси $-Y$. Стрелка прибора отклонилась влево.

65. Германий. Стрелка прибора отклонилась вправо, индукция магнитного поля - по оси Y . Куда направлен ток?

66. Кремний. Стрелка прибора отклонилась вправо, индукция магнитного поля - по оси $-Y$. Куда направлен ток?

67. Германий. Стрелка прибора отклонилась влево, индукция магнитного поля - по оси $-Y$. Куда направлен ток?

68. Германий. Ток направлен по оси X . Стрелка прибора отклонилась вправо. Куда направлен вектор индукции магнитного поля?

Задачи 69-71. Что такое подвижность носителей заряда? Почему подвижность зависит от температуры?

68. Опишите зависимость подвижности и удельного сопротивления металлов от температуры.

69. Опишите зависимость подвижности и удельного сопротивления примесных полупроводников от температуры.

70. Опишите зависимости $\ln\gamma(1/T)$ для примесного полупроводника.

71. Опишите зависимости $\ln\gamma(1/T)$ для примесного полупроводника при различных концентрациях примеси.

Задачи 72-74. Опишите методику определения (схему, последовательность операций, формулы) ширины запрещенной зоны с помощью экспериментального определения зависимости:

72. Силы тока от температуры при фиксированном напряжении.

73. Удельной объемной проводимости от температуры.

74. Концентрации носителей заряда от температуры.

75. Удельного объемного сопротивления от температуры.

Задачи 76- 79. Что такое фотопроводимость полупроводников (примесная, собственная)? Опишите строение, марки и параметры фоторезисторов. Как определяется красная граница? Всегда ли при освещении проводимость возрастает? Что такое время жизни носителей?

76. Опишите спектральную характеристику фоторезисторов. Почему фототок уменьшается как при увеличении длины волны, так и при ее уменьшении? Как определяется красная граница фотоэффекта?

77. Как определяется ширина запрещенной зоны полупроводника при известном значении величины красной границы?

78. Почему температура испытаний влияет на значение красной границы?

Задачи 79- 83. Опишите методы получения слитков германия и стадии обработки материала для получения заготовок для твердотельной электроники. В каких приборах применяется данный материал? Почему удельное сопротивление зависит от типа носителей и их концентрации?

79. Определите удельное сопротивление германия р-типа при концентрации носителей 10^{20} м^{-3} , $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

80. Определите удельное сопротивление германия n-типа при концентрации носителей 10^{22} м^{-3} , $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

81. Для чего используется диффузия примесей в германий? Что такое коэффициент диффузии и чему он равен при $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$?

82. Опишите зависимость удельной проводимости германия n-типа от температуры и концентрации примесей (мышьяк).

83. Сравните диапазоны температур, при которых могут работать германиевые и кремниевые приборы. Почему они отличаются друг от друга?

Задачи 84- 88. Опишите методы получения слитков кремния и стадии обработки материала для получения заготовок для твердотельной электроники. В каких приборах применяется данный материал?

Почему удельное сопротивление зависит от типа носителей и их концентрации?

84. Определите удельное сопротивление кремния р-типа при концентрации носителей 10^{22} м^{-3} , $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

85. Определите удельное сопротивление кремния n-типа при концентрации носителей 10^{24} м^{-3} , $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

86. Для чего используется диффузия примесей в кремний? Что такое коэффициент диффузии и чему он равен при $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$?

87. Опишите зависимость удельной проводимости кремния n-типа от температуры и концентрации примесей (фосфор).

88. Сравните диапазоны температур, при которых могут работать германиевые и кремниевые приборы. Почему они отличаются друг от друга?

Задачи 89 -92. Опишите свойства, технологию получения и обработки, области применения материалов:

89. Типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}$. **90.** Типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. **91.** Типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$.

92. Для изготовления варисторов, термисторов, позисторов, тензорезисторов. Какие физические процессы протекают в данных полупроводниковых приборах?

93. Опишите строение, принцип работы и применение диодов Ганна

94. Опишите современные методы очистки полупроводниковых материалов и методах создания примесных (акцепторных и донорных) полупроводников.

95. Опишите современные методы создания микросхем.

96. Опишите перспективы и особенности развития нанотехнологии при производстве полупроводниковых приборов новых поколений.