



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*Физический факультет*

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ТЕРМОДИНАМИКА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ**

Кафедра экспериментальной физики

Образовательная программа

**11.03.04- Электроника и наноэлектроника**

Профили подготовки:

**Микроэлектроника и твердотельная электроника**

Уровень высшего образования

**Бакалавриат**

Форма обучения:

**Очная**

Статус дисциплины:

**Вариативная**

Махачкала 2017

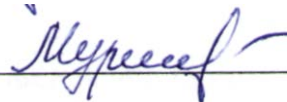
Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВОпо направлению подготовки 11.03.04- Электроника и наноэлектроника, профиль подготовки: микроэлектроника и твердотельная электроника (уровень: бакалавриата) - Приказ Минобрнауки России от 12.03.2015 №218.

Разработчик (и): кафедра экспериментальной физики, Шабанов Ш.Ш., к.т.н., доцент

Рабочая программа дисциплины одобрена: на заседании кафедры экспериментальной физики от «31» марта 2017г., протокол № 8

Зав. кафедрой —  Садыков С.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от «31» марта 2017г., протокол № 7.

Председатель —  Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением

«3» апреля 2017г.  Гасангаджиева А.Г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация рабочей программы .....	4
1. Цели освоения дисциплины.....	5
2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры.....	5
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины.....	6
4. Объем, структура и содержание дисциплины.....	9
5. Образовательные технологии.....	18
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов...	19
7. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.....	20
7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.....	21
7.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, описание шкал оценивания.....	22
7.3. Типовые контрольные задания.....	25
7.4. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.....	32
8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.....	33
9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	34
10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины....	35
11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.....	36
12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	36

## Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина «Термодинамика твёрдых растворов» входит в вариативную часть образовательной программы бакалавриата по направлению 11.03.04 Электроника и наноэлектроника. Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой экспериментальной физики.

Содержание дисциплины включает основные физико-химические закономерности и принципы определяющие образование растворов, основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы и типы твёрдых растворов.

Дисциплина нацелена на формирование следующих компетенций выпускника:

**общекультурных:** способностью к самоорганизации и самообразованию (ОК-7);

**общепрофессиональных:** способностью представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1); способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2);

**профессиональных:** готовностью анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций (ПК-3).

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: лекции, практические занятия, самостоятельная работа. Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости в форме: тестирование, индивидуальное собеседование, письменные контрольные задания и пр. и промежуточный контроль в форме экзамен.

Объем дисциплины 3 зачетных единиц, в том числе в академических часах по видам учебных занятий:

Семес тр	Учебные занятия						СРС, в том числе экзамен	Форма промежуточной аттестации (зачет, дифференцирован ный зачет, экзамен
	в том числе							
	Контактная работа обучающихся с преподавателем							
	Всего	из них						
		Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	КСР	консультации		

6	108	8		10	36		54	экзамен
---	-----	---	--	----	----	--	----	---------

## 1. Цели освоения дисциплины

**Цель изучения дисциплины** «Термодинамики твёрдых растворов» состоит в формировании у студентов теоретических знаний практических навыков в области теории растворов в различных модельных приближениях на базе термодинамических соображений, для рассмотрения основных особенностей поведения примесей в полупроводниковой матрице в зависимости от химической природы растворённого компонента и растворителя.

**Задачами дисциплины** является подготовка будущих специалистов к грамотному использованию достижений данной области науки в своей практической деятельности.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина «Термодинамики твёрдых растворов» в структуре ООП ВПО относится к профессиональному циклу (дисциплины по выбору студента) входит в **вариативную часть** образовательной программы. Основные разделы программы курса: Основные особенности поведения примеси в легированном полупроводнике, критерии выбора легирующего компонента, природа взаимодействия компонентов легированного кристалла с позиций химической термодинамики, термодинамический анализ растворимости легирующих элементов полупроводниковой матрице.

Для успешного освоения дисциплины обучающимся студентам необходимы знания следующих курсов:

- термодинамика и статистическая физика;
- физическая химия;
- термодинамика материалов;

- материаловедение полупроводников и диэлектриков

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения) .

Компетенции	Формулировка компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)
ОК-7	способность к самоорганизации и самообразованию	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• понятия «самостоятельная работа студентов», «самоорганизация», «самоконтроль», «самообразование»;</li><li>• формы, технологии организации самостоятельной работы;</li><li>• пути достижения образовательных результатов и способы оценки результатов обучения*;</li><li>• виды, формы контроля успеваемости в вузе</li></ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• системно анализировать, обобщать информацию, формулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения;</li><li>• использовать в образовательном процессе разнообразные ресурсы;</li><li>• объективно оценивать знания обучающихся на основе тестирования</li></ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• культурой мышления, способностью к анализу, обобщению информации, постановке целей и выбору путей их достижения;</li><li>• навыками составления результаториентированных планов-графиков выполнения различных видов учебной, научно-исследовательской и внеучебной работы; способами самоконтроля, самоанализа, демонстрировать</li></ul>

		стремление к самосовершенствованию, познавательную активность.
ОПК-1	способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• современные теории образования твёрдых растворов ;</li> <li>• основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы;</li> <li>• современные тенденции развития материаловедения, электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий;</li> <li>• понимать современные тенденции в развитии теории твёрдых растворов.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области теории твёрдых растворов;</li> <li>• самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с образованием твёрдых растворов.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности;</li> <li>• навыками представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики.</li> </ul>
ОПК-2	способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;</li> <li>• методы вычислительной физики и математического моделирования</li> </ul>

	<p>деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p>структур, приборов или технологических процессов образования твёрдых растворов;</p> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• использовать физическую сущность процессов, протекающих при образовании твёрдых растворов;</li> <li>• создавать и анализировать на основе физических законов и их следствий теоретические модели явлений природы, получить навыки использования в практике важнейших физических измерительных приборов и приемов;</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• навыками оценки и измерения параметров твёрдых растворов;</li> <li>• навыками привлекать для решения проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, соответствующий физико-математический аппарат.</li> </ul>
ПК-3	<p>готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• принципы и закономерности образования твёрдых растворов;</li> <li>• фазовые равновесия и переходы;</li> <li>• основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы;</li> <li>• типы твёрдых растворов;</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• использовать основные законы и методы исследования твёрдых растворов ;</li> <li>• использовать понятийный и терминологический аппарат в профессиональной деятельности;</li> <li>• самостоятельно находить решения поставленной задачи;</li> <li>• критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы;</li> <li>• работать и анализировать научно-</li> </ul>



		<p>техническую информацию.</p> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• методами экспериментальных исследований параметров их характеристик твёрдых растворов;</li><li>• современными программными средствами моделирования и проектирования при образовании твёрдых растворов;</li><li>• методикой расчета основных параметров твёрдых растворов;</li><li>• методами количественного формулирования и решения задач в области образования твёрдых растворов;</li><li>• опытом понимания качества исследований, относящихся к области твёрдых растворов;</li><li>• методами самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами получения твёрдых растворов;</li></ul>
--	--	--

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины.

4.1. Объем дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 академических часов.

4.2. Структура дисциплины.

№ п/ п	Разделы и темы дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости ( <i>по неделям семестра</i> )  Форма промежуточной аттестации ( <i>по семестрам</i> )
				Лекции	Практическ ие занятия	Лаборатор ные	Контроль самост		
	<b>Модуль 1.</b>								
1	Основные особенности поведения примеси в легированном полупроводнике	6		2	2		6	10	Домашнее задание (ДЗ)  Собеседование (С)  Рейтинговая система (РС)
2	Природа взаимодействия компонентов легированного кристалла с позиций химической термодинамики	6		2	4		6	12	(ДЗ), (С), (РС)

	<i>Итого по модулю 1: 48</i>			4	6		12	22	
	<b>Модуль 2</b>								
3	Термодинамический анализ растворимости легирующих элементов в полупроводниковой матрице.	6		2	2		8	12	(ДЗ), (С), (РС)
4	Термодинамика распада полупроводниковых твёрдых растворов. Критерии выбора легирующего компонента	6		2	2		4	10	(ДЗ), (С), (РС)
1	<i>Итого по модулю 2: 52</i>			4	4		12	22	
	<b>ИТОГО:</b>			8	10		36	54	

#### 4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).

##### **Модуль 1.**

##### **Тема 1. Основные особенности поведения примеси в легированном полупроводнике.**

Введение. Характер влияния примеси на свойства матрицы. Простые и сложные доноры и акцепторы. Примеси замещения в решетке Ge и Si. Влияние примеси замещения на свойства полупроводникового соединения. Примеси внедрения. Отступление от стехиометрии. Особенности поведения

быстродиффундирующих примесей. Взаимодействие примеси с атомами матрицы и структурными дефектами кристалла

## **Тема 2. Природа взаимодействия компонентов легированного кристалла с позиций химической термодинамики.**

Парциальные мольные величины системы. Расчёт парциальных величин по мольным. Относительные (разностные) парциальные мольные величины. Основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы. Идеальные растворы. Неидеальные разбавленные растворы. Избыточные молярные значения экстенсивных величин.

### **Модуль 2.**

## **Тема 3. Термодинамический анализ растворимости легирующих элементов в полупроводниковой матрице.**

Анализ равновесия фаз в системе с непрерывным рядом твёрдых растворов в твёрдом и жидком состояниях. Приближение идеальных растворов. Приближение регулярных растворов. Случаи ограниченной растворимости примесного элемента в твёрдом полупроводнике. Матричный элемент нерастворим в примесном компоненте.

## **Тема 4. Термодинамика распада полупроводниковых твёрдых растворов. Критерии выбора легирующего компонента.**

Критерий устойчивости системы полупроводник-примесь. Критическая температура распада. Основные физико-химические и термодинамические принципы образования твёрдого раствора. Геометрический фактор. Электрохимический фактор. Электроотрицательность компонентов смешанной системы.

## Содержание лекционных занятий

Модули	Содержание темы
Модуль 1	<p><b><u>Лекция 1.</u></b></p> <p>Введение. Характер влияния примеси на свойства матрицы. Простые и сложные доноры и акцепторы. Примеси замещения в решетке Ge и Si. Влияние примеси замещения на свойства полупроводникового соединения. Примеси внедрения. Отступление от стехиометрии. Особенности поведения быстродиффундирующих примесей. Взаимодействие примеси с атомами матрицы и структурными дефектами кристалла</p> <p><b><u>Лекция 2.</u></b></p> <p>Парциальные мольные величины системы. Расчёт парциальных величин по мольным. Относительные (разностные) парциальные мольные величины. Основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы. Идеальные растворы. Неидеальные разбавленные растворы. Избыточные молярные значения экстенсивных величин.</p>

**Модуль 2****Лекция 3.**

Анализ равновесия фаз в системе с непрерывным рядом твёрдых растворов в твёрдом и жидком состояниях.

Приближение идеальных растворов. Приближение регулярных растворов. Случаи ограниченной растворимости примесного элемента в твёрдом полупроводнике. Матричный элемент нерастворим в примесном компоненте.

**Лекция 4.**

Критерий устойчивости системы полупроводник-примесь. Критическая температура распада Основные физико-химические и термодинамические принципы образования твёрдого раствора. Геометрический фактор. Электрохимический фактор. Электроотрицательность компонентов смешанной системы.

## Содержание разделов самостоятельной работы

№	Содержание темы	Кол.час ов
1.	<b>Основные особенности поведения примеси в легированном полупроводнике</b>  Приближение модели водородоподобного атома (расчёт для Si и Ge энергию ионизации донора и боровский радиус его электронной орбиты). Способы выражений концентраций и взаимный их пересчёт.	12
2.	<b>Природа взаимодействия компонентов легированного кристалла с позиций химической термодинамики</b>  Парциальные молярные величины Идеальные растворы. Закон Рауля. Неидеальные разбавленные растворы. Закон Генри.	10
3.	<b>Термодинамический анализ растворимости легирующих элементов в полупроводниковой матрице</b>  Анализ равновесия фаз в системе с непрерывным рядом твёрдых растворов в твёрдом и жидком состояниях.	12
4.	<b>Термодинамика распада полупроводниковых твёрдых растворов.</b>  Критерий устойчивости системы полупроводник-примесь. Критическая температура распада твёрдого раствора.	10
5.	<b>Общие принципы образования растворов.</b>  Геометрический фактор. Электрохимический фактор. Электроотрицательность компонентов смешанной системы.	10

### 5. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий с применением, как правило, компьютерных и технических средств, учебного и научного оборудования являются:

- Информационные технологии.
- Проблемное обучение.

- Индивидуальное обучение.
- Междисциплинарное обучение.
- Опережающая самостоятельная работа.

Для достижения определенных компетенций используются следующие формы организации учебного процесса: лекция(информационная, проблемная, лекция-визуализация, лекция-консультация и др.), практическое занятие, семинар, самостоятельная работа, консультация. Допускаются комбинированные формы проведения занятий, такие как лекционно-практические занятия.

Преподаватель самостоятельно выбирают наиболее подходящие методы и формы проведения занятий из числа рекомендованных и согласуют выбор с кафедрой.

Реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий и организации внеаудиторной работы (компьютерных симуляций, деловых и ролевых игр, разбора конкретных ситуаций, психологических и иных тренингов) с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся. Интерактивное обучение – метод, в котором реализуется постоянный мониторинг освоения образовательной программы, целенаправленный текущий контроль и взаимодействие (интерактивность) преподавателя и студента в течение всего процесса обучения.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физика конденсированного состояния» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность студентов.

По лекционному материалу подготовлено учебное пособие, конспекты лекций в электронной форме и на бумажном носителе, большая часть теоретического материала излагается с применением слайдов (презентаций) в программе **PowerPoint**, а также с использованием интерактивных досок.



Обучающие и контролирующие модули внедрены в учебный процесс и размещены на Образовательном сервере Даггосуниверситета (<http://edu.icc.dgu.ru>), к которым студенты имеют свободный доступ.

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.**

### ***Промежуточный контроль.***

В течение семестра студенты выполняют:

- домашние задания, выполнение которых контролируется и при необходимости обсуждается на практических занятиях;
- промежуточные контрольные работы во время практических занятий для выявления степени усвоения пройденного материала;
- выполнение итоговой контрольной работы по решению задач, охватывающих базовые вопросы курса: в конце семестра.

### ***Итоговый контроль.***

Экзамен в конце 6 семестра, включающий проверку теоретических знаний и умение решения по всему пройденному материалу.

Изучать дисциплину рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них по программе учебной дисциплины. При первом чтении следует стремиться к получению общего представления об изучаемых вопросах, а также отметить трудные и неясные моменты. При повторном изучении темы необходимо освоить все теоретические положения, математические зависимости и выводы. Для более эффективного запоминания и усвоения изучаемого материала, полезно иметь рабочую тетрадь (можно использовать лекционный конспект) и заносить в нее формулировки законов и основных понятий, новые незнакомые термины и названия, формулы, уравнения, математические зависимости и их выводы, так как при записи материал значительно лучше усваивается и запоминается.

## **7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.**

Фонды оценочных средств (контрольные вопросы и типовые задания для практических занятий, зачета; тесты и компьютерные тестирующие программы, примерную тематику рефератов и т.п., а также иные формы контроля, позволяющие оценить степень сформированности компетенций обучающихся) для проведения текущего, промежуточного и итогового контроля успеваемости и промежуточной аттестации имеются на кафедре. Они также размещены на образовательном сервере Даггосуниверситета (по адресу: <http://edu.dgu.ru>), а также представлены в управление качества образования ДГУ.

Методические рекомендации преподавателям по разработке системы оценочных средств и технологий для проведения текущего контроля успеваемости по дисциплинам (модулям) ООП (тематики докладов, рефератов и т.п.), а также для проведения промежуточной аттестации по дисциплинам (модулям) ООП (в форме зачетов, экзаменов, курсовых работ / проектов и т.п.) и практикам представлены в Положении «О модульно-рейтинговой системе обучения студентов Дагестанского государственного университета», утвержденном ученым Советом Даггосуниверситета.

Уровень освоения учебных дисциплин обучающимися определяется следующими оценками: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценки "отлично" заслуживает обучающийся, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умение свободно выполнять практические задания, предусмотренные программой, усвоивший основную литературу и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой.

Оценки "хорошо" заслуживает обучающийся, обнаруживший полное знание учебного материала, успешно выполняющий предусмотренные в программе практические задания, усвоивший основную литературу, рекомендованную в программе.

Оценки "удовлетворительно" заслуживает обучающийся, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, справляющийся с выполнением практических заданий, предусмотренных программой, знакомых с основной литературой, рекомендованной программой.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется обучающемуся, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала,

допустившему принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой практических заданий.

### 7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.

Перечень компетенций с указанием этапов их формирования приведен в описании образовательной программы.

Компетенция	Знания, умения, навыки	Процедура освоения
ОПК-1 ОПК-2 ПК-3	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• проблемы современной теории образования твёрдых растворов;</li> <li>• понимание современных тенденций развития материаловедения, электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий;</li> <li>• основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;</li> <li>• методы вычислительной физики и математического моделирования структур, приборов или технологических процессов получения твёрдых растворов;</li> <li>• принципы использования физических закономерностей в технологии получения твёрдых растворов;</li> <li>• рассчитывать массовые, молярные и др. проценты составы компонент твёрдых растворов;</li> <li>• анализа равновесия фаз в системе с непрерывным рядом твёрдых растворов в твёрдом и жидком состояниях в приближении идеальных и регулярных растворов;</li> <li>• причины образования пересыщенных твёрдых растворов;</li> <li>• построения двухкомпонентных</li> </ul>	Устный опрос, письменный опрос, тестирование, выступление на семинарах

	<p>диаграмм состояния по кривым охлаждения для разных составов.</p>	
<p>ОПК-1, ОПК-2, ПК-3</p>	<p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализировать, систематизировать и обобщать научно-техническую информацию в области теории твёрдых растворов;</li> <li>• самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами синтеза полупроводниковых твёрдых растворов;</li> <li>• использовать физическую сущность процессов, протекающих при получении твёрдых растворов;</li> <li>• создавать и анализировать на основе физических законов и их следствий теоретические модели явлений природы, получить навыки использования в практике важнейших физических измерительных приборов и приемов;</li> <li>• делать расчёт парциальных величин;</li> <li>• делать расчёты применяя правила рычага при расчёте количества твёрдой и жидкой фаз двухкомпонентных систем;</li> <li>• использовать базовые термодинамические понятия теории твёрдых растворов для решения задач получения твёрдых растворов;</li> <li>• применять методы моделирования в теории твёрдых растворов;</li> <li>• анализировать информацию о новых технологиях получения твёрдых растворов.</li> </ul>	<p>Письменный опрос, контрольные задания, проверка рефератов, выступление на семинарах</p>
<p>ОПК-1, ОПК-2, ПК-3</p>	<p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методологией теоретических и экспериментальных исследований</li> </ul>	<p>Устный опрос, письменный опрос, тестирование,</p>

	<p>в области теории твёрдых растворов;</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• навыками представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;</li><li>• навыками оценки и измерения параметров при получении полупроводниковых твёрдых растворов;</li><li>• навыками привлекать для решения проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, соответствующий физико-математический аппарат;</li><li>• методами экспериментальных исследований параметров и характеристик твёрдых растворов;</li><li>• современными программными средствами моделирования и проектирования процессов получения твёрдых растворов;</li><li>• методикой расчета основных технологических параметров при получении твёрдых растворов;</li><li>• методами количественного формулирования и решения задач в области синтеза твёрдых растворов;</li><li>• опытом понимания качества исследований, относящихся к области получения новых материалов;</li><li>• методами самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами получения твёрдых растворов.</li></ul>	<p>выступление на семинарах, студенческая конференция.</p>
--	---	--

## 7.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, описание шкал оценивания.

Схема оценки уровня формирования компетенции

### ОК-7 - способность к самоорганизации и самообразованию

Уровень	Показатели (что обучающийся должен продемонстрировать)	Оценочная шкала		
		Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Пороговый	Представление о самостоятельной работе по предмету, формах организации самостоятельной работы и самоконтроля, путей их достижения, способов оценки результатов обучения	Знаком с методами организации самостоятельной работы и самоконтроля, путями их достижения, а также способами оценки результатов обучения	Показывает знания методов организации самостоятельной работы и самоконтроля, путей их достижения, а также способов оценки результатов обучения	Демонстрирует четкие знания методов и умение организации самостоятельной работы и самоконтроля, показывает готовность к пониманию путей их достижения, а также способов оценки результатов обучения
Базовый	Общее представление о методах анализа и обобщения информации, умение сформулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения; использовать в образовательном процессе	Знаком с методами анализа и обобщения информации, может участвовать в формулировке цели и предлагать пути их достижения	Демонстрирует знание методов анализа и обобщения информации, показывает умение сформулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения	Показывает знания методов анализа и обобщения информации, показывает умение сформулировать цели и самостоятельно находить пути их достижения, готовность

	разнообразные ресурсы			использовать в образовательном процессе разнообразные ресурсы
--	-----------------------	--	--	---

## ОПК-1

способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;

Уровень	Показатели (что обучающийся должен продемонстрировать)	Оценочная шкала		
		Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Пороговый	Представление об основных положениях, законах и методах естественных наук и математики, представление о научной картине мира	Имеет общее представление о основных положениях, законах и методах естественных наук и математики и о научной картине мира	Демонстрирует знание основных положений, законов и методов естественных наук и математики, и о научной картине мира	Показывает знание основных положений, законов и методов естественных наук и математики, умеет представлять научную картину мира
Базовый	Умение представить адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов	Имеет общее представление о современном состоянии и мировых тенденциях развития естественных наук и математики, имеет представление о научной	Демонстрирует знание современного состояния и мировых тенденций развития естественных наук и математики, адекватно представляет научную	Способен систематизировать и обобщать знания о современном состоянии и мировых тенденциях развития естественных наук и математики, умеет грамотно

	естественных наук и математики	картине мира	картину мира	представлять научную картину мира
--	--------------------------------	--------------	--------------	-----------------------------------

## ОПК-2

способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат.

Уровень	Показатели (что обучающийся должен продемонстрировать)	Оценочная шкала		
		Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Пороговый	Общее представление о современном состоянии и проблемах развития теории роста кристаллов, умение привлекать для их решения соответствующий математический аппарат	Имеет общее представление о современном состоянии и проблемах развития теории твёрдых растворов, знаком с физико-математическим аппаратом для решения возникающих проблем	Демонстрирует знание современного состояния и проблем развития теории твёрдых растворов, проявляет готовность самостоятельно находить пути их решения	Показывает знания современного состояния и проблем развития теории твёрдых растворов, умение решать типовые задачи, готовность к усвоению нового материала
Базовый	Умение выявлять естественнонаучную сущность, теории роста кристаллов привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	Имеет общее представление о проблемах, и теории твёрдых растворов обладает навыками применения физико-математического аппарата для решения	Показывает знания в области, теории твёрдых растворов использовать физико-математический аппарат для решения возникающих проблем	Демонстрирует умение выявлять естественнонаучную сущность проблем, теории твёрдых растворов, умение самостоятельно находить методы



		возникающих проблем		решения типовых задач
--	--	---------------------	--	-----------------------

**ПК-3** - готовностью анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.

Уровень	Показатели (что обучающийся должен продемонстрировать)	Оценочная шкала		
		Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Пороговый	Представление о методах анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения твёрдых растворов, и представления материалов в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.	Имеет общее представление о методах анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения твёрдых растворов.	Демонстрирует знание методов анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения твёрдых растворов их представления в виде научных отчетов	Демонстрирует навыки применения методов анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения твёрдых растворов и представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций
Базовый	Умение анализировать, систематизировать, обобщать и моделировать результаты изучения процессов получения твёрдых растворов	Показывает навыки анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения твёрдых	Способен анализировать, систематизировать, обобщать и моделировать результаты изучения процессов получения	Имеет успешный опыт анализа, систематизации, обобщения и моделирования результатов изучения процессов получения

	представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций.	растворов и умение работать с литературными источниками	твёрдых растворов их представления в виде научных отчетов, публикаций, презентаций	твёрдых растворов, представления материалов в виде научных отчетов, публикаций, презентаций
--	---	---	--	---

Если хотя бы одна из компетенций не сформирована, то положительная оценки по дисциплине быть не может.

### 7.3. Типовые контрольные задания

#### Темы практических занятий.

Целью практических занятий является закрепление и углубление представлений о физико-химических и термодинамических принципах образования твёрдых растворов, а также умение их применять при решении конкретных практических задач.

#### **Раздел 1. Основные особенности поведения примеси в легированном полупроводнике. Критерии выбора легирующего компонента.**

Тема 1. Приближение модели водородоподобного атома (расчёт для Si и Ge энергию ионизации донора и борковский радиус его электронной орбиты).  
(практическое занятие)

Вопросы к теме:

1. В каких случаях примесные атомы дают отдельные уровни и в каких случаях образуют примесную зону? Что называется простым донором и акцептором?
2. Как определить энергию ионизации примесного атома? (приближение модели водородоподобного атома).
3. Каким образом примеси замещения влияют на свойства полупроводникового соединения?

Тема 2. Основные физико-химические и термодинамические принципы образования твёрдого раствора. (дискуссия)

Вопросы к теме:

1. Чем определяется устойчивость того или иного состояния термодинамической системы? Когда компоненты образуют стабильный, метастабильный растворы и механическую смесь?
2. Назовите основные физико-химические принципы образования твёрдого раствора?
3. Каким образом соотношение между термодинамическими функциями смешения влияет на типы диаграмм состояния?

Тема 3. Способы выражений концентраций и взаимный их пересчёт.

(практическое занятие)

1. Что называется растворами? Что является важнейшей характеристикой раствора?
2. Каким образом можно выразить состав раствора?
3. Что называется массовым, молярным и моляльным долей компонента?

Тема 4. Геометрический и электрохимический факторы. (практическое занятие)

1. При какой разнице атомных радиусов замещающего и замещённого атомов нельзя ожидать получения твёрдых растворов?
2. Что называется электроотрицательностью компонентов смешанной системы?
3. В чём состоит эффект относительной валентности и критерий электронной концентрации?

## **Раздел 2. Природа взаимодействия компонентов легированного кристалла с позиций химической термодинамики.**

Тема 5. Парциальные молярные величины. (практическое занятие)

1. Что называется парциальной молярной величиной?
2. Каким образом рассчитываются парциальные молярные величины?
3. Каким образом можно выразить любое свойство раствора через парциальные молярные величины?

Тема 6. Основные соотношения термодинамики смешения компонентов бинарной системы. (дискуссия).

1. При каком условии наблюдается максимальная работа при постоянной температуре?
2. Как связаны между собой энергия Гиббса и энтальпия?
3. Каким образом можно записать основные соотношения идеального процесса смешения двух компонентов с образованием одного моля раствора?

Тема 7. Идеальные растворы. Закон Рауля. (практическое занятие).

1. Что является характерным признаком идеального раствора?
2. В чём заключается закон Рауля?
3. Почему закон Вегарда можно применять для идеального бинарного раствора? В чём заключается закон Вегарда?

Тема 8. Неидеальные разбавленные растворы. Закон Генри. (практическое занятие).

1. Что называется разбавленным раствором?
2. В чём заключается закон Генри?
3. При каких пороговых концентрациях растворённого вещества начинается отклонение от закона Генри?

Тема 9. Квазихимическая концепция раствора. Термодинамические свойства бинарного нанодисперсного раствора. (практическое занятие)

1. В чём заключается квазихимическая концепция раствора?
2. В чём отличие термодинамических свойств массивного бинарного твёрдого раствора от термодинамических свойств нанодисперсного?
3. Как выглядит энтальпия смешения для идеального и регулярного растворов в приложении квазихимической концепции?

### **Раздел 3. Термодинамический анализ растворимости легирующих элементов в полупроводниковой матрице. Термодинамика распада полупроводниковых твёрдых растворов.**

Тема 10. Анализ равновесия фаз в системе с непрерывным рядом твёрдых растворов в твёрдом и жидком состояниях.

1. Что называется непрерывным рядом твёрдых растворов? (Нарисовать диаграмму двухкомпонентной системы для непрерывных твёрдых растворов).
2. Написать уравнения Шредера. Что можно рассчитать с помощью уравнений Шредера?
3. В чём заключается ретроградная растворимость примесей?

Тема 11. Критерий устойчивости системы полупроводник-примесь. Критическая температура распада твёрдого раствора. (практическое занятие).

1. Чем определяется устойчивость того или иного состояния термодинамической системы?
2. Что называются спинодами?
3. Что называется критической температурой распада твёрдого раствора?

#### **Пример задач для промежуточного контроля**

##### **Контрольные вопросы**

1. В приближении модели водородоподобного атома рассчитать для кремния и германия энергию ионизации донора  $\Delta W_d$  и боровский радиус его электронной орбиты  $r_d$ . При расчёте эффективную массу электронов  $m_n$  в кремнии и германии принять равной соответственно  $0,5m_0$  и  $0,2m_0$ . Диэлектрические проницаемости полупроводников:  $\epsilon_{Si}=12,5$ ;  $\epsilon_{Ge}=16$ .
2. В арсениде галлия эффективная масса электронов  $m_n=0,07m_0$ , а диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=13$ . Определить, при какой минимальной концентрации доноров станут заметны эффекты, связанные с перекрытием электронных оболочек соседних примесных атомов.
3. В приближении модели водородоподобного атома оценить, во сколько раз отличаются энергии ионизации доноров в кремнии и в арсениде галлия, если эффективные массы электронов соответственно равны  $0,5m_0$  и  $0,067m_0$ , а диэлектрические проницаемости этих материалов:  $\epsilon_{Si}=12,5$ ;  $\epsilon_{GeAs}=13,1$ .

4. Сформулируйте основные условия полной взаимной растворимости компонентов при образовании твёрдых растворов на основе полупроводниковых химических соединений.
5. Известно, что при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  растворимость мышьяка  $X_{\text{As}}^{\text{L}}$  в жидком галлии составляет 2,0 ат.%. Рассчитать, какое количество арсенида галлия  $m_{\text{GaAs}}$  необходимо растворить в 10 г галлия, чтобы получить насыщенный раствор-расплав при данной температуре.
6. Рассчитать массу элементарных компонентов, используемых для образования  $1 \text{ мм}^3$  твёрдого раствора  $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ . Считать, что в твёрдых растворах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  соблюдается закон Вегарда. Необходимые сведения о бинарных соединениях, образующих твёрдый раствор. Взять из справочника.
7. Определить плотность твёрдого раствора  $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$  в предположении справедливости закона Вегарда. Периоды решеток исходных бинарных соединений, образующих твёрдый раствор, принять равными 0,545 и 0,587 нм.
8. Вычислить период решетки твёрдого раствора  $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$ , если плотность материала  $d=4,89 \text{ Мг/м}^3$ .
9. Определить период кристаллической решетки твёрдого раствора  $\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$  по известным параметрам решеток исходных бинарных соединений:  $a_{\text{GaAs}}=0,5653 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{InAs}}=0,6058 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{GaSb}}=0,6096 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{InSb}}=0,6479 \text{ нм}$ ; в предположении справедливости закона Вегарда.
10. Каким типом электропроводности обладают полупроводники типа  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , легированные атомами элементов IV группы Периодической таблицы элементов?
11. Определить, при каких значениях  $x$  и  $y$  период кристаллической решетки твёрдых растворов  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$  совпадает с периодом решетки фосфида индия. Каким образом свойство изопериодичности твёрдых растворов используется в материалах электронной техники?
12. Определить, какая из двух пар атомов: Li и F или Na и Cl – характеризуются большей разностью электроотрицательностей?
13. Используя термодинамические соображения, исследовать влияние давления внешней среды на температуру плавления кремния. Определить температуру плавления кремния при давлении  $9,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

14. Расплавы германия с галлием близки к идеальным. Считать, что молярные теплоёмкости чистого германия в жидком и твёрдом состоянии равны, построить линию ликвидус диаграммы состояния германий-галлий.

*Указание.* Поскольку жидкие растворы германия с галлием идеальны, то коэффициент активности германия в жидком сплаве  $\gamma_1^L=1$  и уравнение, связывающее термодинамические функции с диаграммой состояния, будет иметь вид

$$\ln X_1^L = \frac{\Delta H_{f_1}}{R} \left( \frac{1}{T^0 - T_l} \right) + \frac{1}{R} \int_{T^0}^{T_l} \frac{dT}{T^2} \int (c_{q_1}^L - c_{p_1}^S) dT,$$

где  $X_1^L$  — атомная доля германия в жидком сплаве при температуре  $T_l$ ;  $\Delta H_{f_1}$  — теплота плавления одного моля германия в точке плавления  $T^0$ ;  $c_{p_1}^L$  и  $c_{p_1}^S$  — молярные теплоемкости чистого германия в жидком и твердом состоянии при  $T_l$ . Так как  $\Delta c_{p_1} = c_{p_1}^L - c_{p_1}^S = 0$ , то уравнение (1) упрощается и приобретает вид

$$\ln X_1^L = \frac{\Delta H_{f_1}}{R} \left( \frac{1}{T^0 - T_l} \right).$$

Подставляя в уравнение (2) значения-величины  $\Delta H_{f_1} = 33,9 \cdot 10^6$  Дж/кмоль,  $T^0 = 1210$  К, строим линию ликвидус диаграммы состояния германий — галлий.

Задача 15. Германий и кремний полностью' растворяются друг в друге, образуя непрерывный ряд жидких и твердых растворов. Считая, что твердые и жидкие растворы германия и кремния близки к идеальным, рассчитать и построить линии ликвидус и солидус диаграммы состояния германий — кремний.

*Указание.* Поскольку установлено, что твердые и жидкие растворы германия и кремния близки к идеальным, можно воспользоваться для анализа следующими уравнениями Шредера:

$$\ln \frac{X_1^S}{X_1^L} = \frac{\Delta H_{f_1}}{R} \left( \frac{1}{T - T_1^0} \right);$$

$$\ln \frac{1 - X_1^S}{1 - X_1^L} = \frac{\Delta H_{f_2}}{R} \left( \frac{1}{T - T_2^0} \right);$$

где  $X_1^S$ , и  $X_1^L$  — концентрация германия соответственно в твердой и-жидкой фазах;  $\Delta H_{f_1}$  и  $\Delta H_{f_2}$ , — теплота плавления соответственно германия и кремния;  $T_1^\circ$  и  $T_2^\circ$  — температура плавления соответственно германия и кремния.

Используя экспериментальные данные  $\Delta H_{f_1} = 33,9 \cdot 10^6$  Дж/кмоль;  $\Delta H_{f_2} = 50,7 \cdot 10^6$  Дж/кмоль;  $T_1^\circ = 1210$  К;  $T_2^\circ = 1685$  К и задаваясь температурой  $T$ , находим из уравнений (1) и (2)  $X_1^S$  и  $X_1^L$ .

Задача 16. Для двойных систем полупроводник — примесь, приведенных в табл. 2, используя квазирегулярное приближение, построить кривые ликвидуса.

Германий			Кремний	
Элемент 1	$a, 10^6,$ Дж/кмоль	$b, 10^3,$ Дж·(кмоль·град) <sup>-1</sup>	$a, 10^6,$ Дж/кмоль	$b, 10^3,$ Дж·(кмоль·град) <sup>-1</sup>
Алюминий	-22,46	-13,24	-17,35	-5,11
Галлий	-0,63	0	13,62	3,48
Индий	6,58	2,34	47,97	14,12
Таллий	23,88	7,96	—	—
Олово	7,04	4,53	34,13	6,28
Свиней	36,79	17,09	83,09	19,19
Мышьяк	-23,46	-17,43	-209,46	-135,75
Сурьма	11,06	8,30	13,78	-6,75
Висмут	23,06	6,24	62,18	8,63
Медь	-30,84	-32,14	-49,90	-30,13
Серебро	-23,05	-29,87	-33,14	-31,97
Золото	-20,38	-4,27	-81,87	43,07
Цинк	—	—	17,93	4,78



Кадмий	17,22	7,33	—	—
--------	-------	------	---	---

*Указание.* В квазирегулярных растворах  $\gamma_1^L \neq 1$ , и уравнение, связывающее термодинамические функции с диаграммой состояния при условии  $\Delta c_{p1} = c_{p1}^L - c_{p1}^S = 0$ , имеет вид

$$\ln \gamma_1^L = \ln \frac{1}{X_1^L} + \frac{\Delta H_{f1}}{R} \left( \frac{1}{T^0} - \frac{1}{T_l} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma_1^L$  - коэффициент активности германия, кремния в жидком сплаве при  $T_l$  и  $X_1^L$ ;  $T^0$  — температура плавления жидкого германия, кремния;  $\Delta H_{f1}$  - теплота плавления одного моля германия, кремния в точке плавления  $T^0$ ;  $c_{p1}^L$ ,  $c_{p1}^S$  - молярные теплоемкости чистого германия, чистого кремния в жидком и твердом состояниях при  $T_l$ ;  $R$  — газовая постоянная.

Коэффициент активности связан с температурой и составом следующим образом:

$$\ln \gamma_1^L = \alpha \frac{(1 - X_1^L)^2}{RT_l}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — параметр взаимодействия, являющийся для квазирегулярных растворов линейной функцией температуры

$$\alpha = a - bT_l. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем уравнение кривой ликвидуса в квазирегулярном приближении

$$T_l = \frac{\Delta H_{f1} + a(1 + X_1^L)^2}{\Delta S_{f1} - R \ln X_1^L + b(1 - X_1^L)^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta S_{f1} = \frac{\Delta H_{f1}}{T^0}$  - энтропия плавления германия, кремния.

Подставляя в уравнение (4) величины  $a$  и  $b$  из табл. 2, а также значения  $\Delta H_{f1} = 33,9 \cdot 10^6$  Дж/кмоль,  $T^0 = 1210$  К для германия и  $\Delta H_{f1} = 50,7 \cdot 10^6$  Дж/кмоль,  $T^0 = 1685$  К для кремния, строим кривые ликвидуса для указанных примесей.

Задача 17. Изменение температуры плавления элементов и их соединений является одним из проявлений влияния давления на фазовое равновесие. При этом возможно не только количественное, но и Качественное изменение диаграммы состояния: появление новых или изменение свойств уже известных фаз.

Пользуясь уравнением Шредера для идеальных растворов, рассчитать смещение эвтектической точки диаграммы состояния кремний — алюминий под действием давления.

*Указание.* Пользуясь уравнением Шредера для идеальных растворов, рассчитываем состав и температуру эвтектики в системе Al—Si при атмосферном давлении.

На основании материалов задачи 12 рассчитываем повышение температуры плавления чистого алюминия (получаем  $6,3 \cdot 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{МН}$ ) и понижение температуры плавления чистого кремния с давлением (получаем  $5,8 \cdot 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{МН}$ ). Используя полученные данные и вновь решая уравнения Шредера, получаем, что эвтектическая точка диаграммы состояния Al — Si смещается на 0,03% в сторону кремния под действием давления  $1 \text{ МН}/\text{м}^2$ , т. е. эвтектика обогащается кремнием. При этом область существования однофазного твердого раствора кремния в алюминии расширяется, что дает возможность получать при кристаллизации под давлением однофазные сплавы с высоким содержанием растворенного компонента, отличающиеся структурой и свойствами от аналогичных сплавов, полученных в процессе кристаллизации при атмосферном давлении.

Задача 18. Какая доля расплава вещества должна закристаллизоваться, чтобы в расплаве в первый раз появилась зона концентрационного переохлаждения? Условия получения кристалла: выращивание производится методом нормальной направленной кристаллизации со скоростью  $v=4,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}$ ; коэффициент диффузии вещества в расплаве  $D=10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент распределения примеси в расплаве вещества  $K=0,4$ ; исходная концентрация примеси в расплаве  $C_L(0)=0,5 \text{ ат. \%}$ ; наклон линии ликвидуса для заданных условий кристаллизации в системе раствор—растворитель равен  $m=4 \text{ К}/(\text{ат. \%})$ ; градиент температуры в расплаве постоянен и равен  $G_L=10 \text{ К}/\text{м}$ ; толщина граничного диффузионного слоя в расплаве  $\delta=10^{-4} \text{ м}$ .

**Решение.** Условием существования концентрационного переохлаждения перед поверхностью кристаллизации в процессе роста кристалла из перемешиваемого расплава является

$$\frac{mvC_L(g)(1-K)}{D[K+(1-K)\exp(-v\delta/D)]} > G_L, \quad (1)$$

где  $C_L(g)$  — концентрация примеси в расплаве вещества после кристаллизации доли расплава, равной  $g$ . При нормальной направленной кристаллизации

$$C_L(g) = C_L(0) \cdot (1-g)^{K_{эфф}^{-1}}, \quad (2)$$

где

$$K_{эфф} = \frac{K}{K+(1-K)\exp(-v\delta/D)}. \quad (3)$$

Подставляя (3) и (2) в (1), находим, что зона концентрационного переохлаждения возникает при

$$g > 1 - \left\{ \frac{C_L(0)mv(1-K)}{G_L D [1+(1-K)\exp(-v\delta/D)]} \right\}^{\frac{1}{1-K_{эфф}}}. \quad (4)$$

Для заданных условий кристаллизации  $K_{эфф}=0,5$ , а концентрационное переохлаждение возникнет при  $g > 62,2\%$ .

**Задача 19.** Два элемента А и В полностью растворяются друг в друге, образуя непрерывный ряд идеальных жидких и твердых растворов. Теплоты и температуры плавления элементов соответственно равны:  $\Delta H_{fA} = 10,1 \cdot 10^6$  Дж/кг — ат,  $\Delta H_{fB} = 3,4 \cdot 10^6$  Дж/кг — ат и  $T_A^\circ = 1200$  К,  $T_B^\circ = 500$  К. Определить составы кристалла, расплава и коэффициент распределения элемента В при вытягивании кристалла из расплава с температурой ликвидуса  $T_L = 1175$  К. Чему равна разность температур ликвидуса  $T_L$  и солидуса  $T_S$  для этого же состава?

**Решение.** Линии ликвидуса и солидуса в бинарной системе А — В для идеальных жидких и твердых растворов описываются системой уравнений

$$\ln \frac{X_B^S}{X_B^L} = \frac{\Delta H_{fB}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_B^0} \right);$$

$$\ln \frac{1-X_B^S}{1-X_B^L} = \frac{\Delta H_{fA}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_A^0} \right).$$

Решение этой системы относительно  $X_B^L$  и  $X_B^S$  дает

$$X_B^L = \frac{\exp \lambda_A - 1}{\exp \lambda_A - \exp \lambda_B};$$

$$X_B^S = \frac{\exp \lambda_A - 1}{\exp(\lambda_A - \lambda_B) - 1},$$

где

$$\lambda_A = \frac{\Delta H_{fA}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_A^0} \right); \quad \lambda_B = \frac{\Delta H_{fB}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_B^0} \right).$$

Используя (3) и (4), получаем выражение для коэффициента распределения компонента Вв А при температуре  $T$ :

$$K = \frac{X_B^S}{X_B^L} = \exp \lambda_B.$$

Температура солидуса  $T_S$  для того же состава, что и расплав, дается решением уравнения

$$X_B^L(T) = X_B^S(T_S) = \frac{\exp \lambda_A(T_S) - 1}{\exp[\lambda_A(T_S) - \lambda_B(T_S)] - 1}.$$

Приближенное решение трансцендентного уравнения (6) можно получить, разлагая члены его в ряд по степени  $\Delta T = T_L - T_S$ . Поскольку для заданного значения  $T_L = 1175 \Delta T$  мало, то в разложениях можно ограничиваться только первыми членами ряда, например

$$\exp \lambda_A(T_S) = \left( 1 + \frac{\Delta H_{fA}}{RT_L^2} \Delta T \right) \exp \lambda_A(T_L) \text{ и т.д.}$$

В результате имеем

$$\Delta T = \frac{RT_L^2 (1 - \exp \lambda_A) (1 - \exp \lambda_B) (\exp \lambda_A - \exp \lambda_B) \exp(-\lambda_A)}{\Delta H_{fA} (\exp \lambda_A - \exp \lambda_B) + \exp \lambda_B (1 - \exp \lambda_A) (\Delta H_{fA} - \Delta H_{fB})},$$

где  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  вычислены при  $T_L$ .

Подставляя данные из условия задачи в выражения (3), (4), (5) и (7), получаем

$$X_B^L = 5,5 \text{ ат. \%}; \quad X_B^S = 3,5 \text{ ат. \%}; \quad K = 0,63 \text{ и } \Delta T = 15 \text{ К.}$$

Задача 20. В твердых растворах на основе полупроводников и диэлектриков эффект ионизации легирующих компонентов оказывает существенное влияние на их термодинамические функции. Учитывая эффект ионизации атомов легирующих элементов, - построить кривые солидуса и температурные зависимости коэффициентов распределения Al, Ga, In, As и Sb в германии и кремнии.

*Указание.* Равновесие, определяющее распределение легирующего компонента между сопряженными жидкой и твердой фазами, может быть представлено в виде



где  $I^L$ ,  $I^S$  — неионизованное состояние легирующего компонента в жидкой и твердой фазах;  $I^I$ ,  $e$  — ионизованное состояние легирующего компонента и носитель тока (электрон или дырка), возникающий в результате ионизации атомов легирующего компонента в твердой фазе.

Концентрации большинства легирующих примесей в твердых растворах на основе германия и кремния, как это видно из диаграмм состояния, ниже 1% атомного, и растворы можно считать разбавленными. Принимая во внимание сильное разбавление, обычно вводится допущение, что нейтральная примесь при гетерогенном равновесии подчиняется закону Генри. Это значит, что при данной температуре коэффициент активности нейтральных атомов  $\gamma^n$  является постоянной величиной и любое изменение распределения Ферми  $F_n = \frac{X^n}{X^S}$  будет приводить к изменению коэффициента активности полной концентрации атомов в твердой фазе  $\gamma^S$ . Следовательно, общая концентрация легирующего компонента в твердой фазе  $X^S$  не будет пропорциональна активности этого компонента в жидкой фазе, т. е. не будет подчиняться закону Генри. Изменение  $X^S$  влечет за собой изменение равновесного коэффициента распределения. К реакции распределения легирующего компонента в нейтральном состоянии между жидкой и твердой фазами, которая записана уравнением (1), применим закон действующих масс в следующем его виде:

$$\frac{N^n}{N^L} = \Theta \exp\left(-\frac{\Delta H^n}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $N^n$  и  $N^L$  — концентрация нейтральных атомов легирующего компонента в твердой фазе и концентрация легирующего компонента в жидкой фазе соответственно.

Считается, что все атомы легирующего компонента в расплаве нейтральны. В уравнении (2)  $\Theta$  является статистическим фактором;  $\Delta H^n$  - энергия, необходимая для перевода одного моля нейтральной легирующей добавки из жидкого справа в твердый раствор. Так как растворимость легирующих компонентов в твердой фазе невелика, то считают, что если уже  $\Delta H^n$  зависит от состава сопряженных фаз, то только от состава жидкой фазы, и это может быть учтено посредством введения в уравнение (2) коэффициента активности легирующего компонента в жидкой фазе ( $\gamma^L$ ):

$$\frac{N^n}{N^L} = \gamma^L \Theta \exp\left(-\frac{\Delta H^n}{RT}\right). \quad (3)$$

Таким образом,  $\Delta H^n$  можно рассматривать не зависящим от состава фаз. Кроме того,  $\Delta H^n$  может изменяться с температурой:

$$\Delta H^n = \Delta H^{n_0} - \alpha T. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем

$$\frac{N^n}{N^L} = \gamma^L \Theta^* \exp\left(-\frac{\Delta H^{n_0}}{RT}\right), \quad (5)$$

где

$$\Theta^* = \Theta \exp\left(\frac{\alpha}{R}\right), \quad (6)$$

$\Delta H^{n_0}$  не зависит от температуры и состава. Член  $\Delta H^{n_0}$  может быть выражен через  $\frac{N^n}{N^L}$ ; при температуре плавления растворителя  $T = T^0$  из уравнения (5):

$$\Delta H^{n_0} = -RT^0 \ln\left(\frac{N^n / N^L}{\gamma^L \Theta^*}\right)_{T^0}. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (5) и (7) дает

$$\left(\frac{N^n}{N^L}\right)_T = (\gamma^L \Theta^*)_T \left(\frac{N^n / N^L}{\gamma^L \Theta^*}\right)_{T^0}^{\frac{T^0}{T}}. \quad (8)$$

Индексы внизу скобок обозначают температуру, которой соответствуют величины, взятые в скобках; отношение  $T^0/T$  — показатель степени. Выражая долю нейтральных атомов через

$$N^n = F_n N^S, \quad (9)$$

получаем уравнение кривой солидуса

$$(N^S)_T = \left( \frac{\gamma^L N^L \Theta^*}{F_n} \right)_T \left( \frac{KF_n}{\gamma^L \Theta^*} \right)_{T^0}^{\frac{T^0}{T}}. \quad (10)$$

Используя (10), можно получить и уравнение температурной зависимости коэффициента распределения:

$$(K)_T = \left( \frac{\gamma^L \Theta^*}{F_n} \right)_T \left( \frac{KF_n}{\gamma^L \Theta^*} \right)_{T^0}^{\frac{T^0}{T}}$$

Теплота плавления обычно слабо зависит от температуры, и с достаточной степенью точности в (4) можно полагать, что  $\alpha = 0$ . Тогда  $\Theta^* = \Theta$  и в свою очередь,  $\Theta$  можно выразить через теплоту плавления  $\Delta H_{f1}$ , и температуру плавления  $(T_2^0)$  легирующего компонента:

$$\Theta = \exp\left(-\frac{\Delta H_{f2}}{RT_2^0}\right). \quad (12)$$

Функция распределения Ферми имеет вид для нейтральных акцепторов

$$F_n = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp(E_F - E_A)/kT}$$

и для нейтральных доноров

$$F_n = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp(E_D - E_F)/kT}$$

где  $E_A$  и  $E_D$ —энергия ионизации соответственно акцепторных и донорных примесей;  $E_F$ —уровень Ферми.

При концентрации доноров  $N_D = N^S \ll n_i$  или при концентрации акцепторов  $N_A = N^S \ll n_i$  расчет уровня Ферми  $E_F$  производится по известной формуле

$$E_F = -\frac{\Delta E}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}.$$

Для плотности состояний  $N_c$  и  $N_v$  в германии и кремнии получены следующие выражения:

$$(\text{Ge}) : N_c = 2,00 \cdot 10^{21} T^{3/2}; N_v = 1,17 \cdot 10^{21} T^{3/2} \text{ м}^{-3}; \quad (16)$$

$$(\text{Si}) : N_C = 5,40 \cdot 10^{21} \text{T}^{3/2}; N_V = 1,95 \cdot 10^{21} \text{T}^{3/2} \text{ м}^{-3}. \quad (17)$$

Концентрации свободных носителей заряда в германии и кремнии рассчитывают по выражениям

$$n_i^2(\text{Ge}) = 3,10 \cdot 10^{44} \text{T}^3 \exp(-0,785/kT), \text{ м}^{-6}; \quad (18)$$

$$n_i^2(\text{Si}) = 1,50 \cdot 10^{45} \text{T}^3 \exp(-1,21/kT), \text{ м}^{-6}. \quad (19)$$

При концентрациях  $N_D = N^S \gg n_i$  или  $N_A = N^S \gg n_i$ ; выражения для уровня Ферми имеют вид

$$E_F \cong kT \ln \frac{N_d}{N_c}; \quad (20)$$

$$E_F \cong kT \ln \frac{N_a}{N_v}. \quad (21)$$

Остальные величины, необходимые для расчета кривых солидуса и температурных зависимостей коэффициентов распределения легирующих примесей в германии и кремнии, приведены в табл. 3, 4, 5.

Таблица 3

Реальный ликвидус для систем с германием и коэффициенты активности легирующих компонентов при различных температурах

$$(\Delta H_f \text{ Ge} = 33,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/кмоль}, T^\circ = 1210 \text{ К})$$

Легирующий компонент	T, К .							
	1210		1200		1100		1000	
	$X^L$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$	$X^h$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$
Al	0	0,53	0,025	0,54	0,245	0,61	0,407	0,68
Ga	0	0,94	0,025	0,94	0,28	0,96	0,495	0,98
In	0	1,46	0,025	1,43	0,31	1,2	0,585	1,1
As	0	0,79	0,064	0,79	0,262	0,78	0,430	0,79
Sb	0	1,1	0,034	1,1	0,300	1,1	0,555	1,07



Таблица 4

Реальный ликвидус для систем с кремнием и коэффициенты активности легирующих компонентов при различных температурах ( $\Delta H_{f, Si} = 50,7 \cdot 10^6$  Дж/кмоль,  $T = 1683$ К) -

Легирующий компонент	T, К									
	1683		1650		1550		1450		1350	
	$X^L$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$	$X^L$	$\gamma^L$
Al	0	0,54	0,06	0,57	0,24	0,65	0,37	0,73	0,49	0,79
Ga	0	1,7	0,08	1,6	0,31	1,4	0,55	1,2	0,74	1,11
		3,9	0,07		0,27	1,0	0,36	0,65	0,40	0,44
As	0	6,0	0,08	2,5	0,73	1,2	0,88	1,0	0,93	1,0
Sb	0			4,7						

Таблица 5.

Коэффициенты распределения для легирующих компонентов при температуре плавления германия и кремния, статистический фактор и энергии ионизации уровней

Легирующий компонент	$K^0$		$\Theta^*$	$E_{A, D, \text{эВ}}$	
	Ge	Si		Ge	Si
Al	0,073	0,002	0,25	0,0102	0,057
Ga	0,087	0,008	0,11	0,0108	0,065
In	0,001	0,0004	0,40	0,0112	0,160
As	0,02	0,3	0,048	0,0127	0,049
Sb	0,003	0,023	0,073	0,0096	0,039

#### **7.4. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.**

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля – 60 % и промежуточного контроля – 40 %.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий - 10 баллов,
- участие на практических занятиях - 25 баллов,
- выполнение лабораторных заданий –,
- выполнение домашних (аудиторных) контрольных работ - 25 баллов.

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 5 баллов,
- письменная контрольная работа - 15 баллов,
- тестирование - 20 баллов.

#### **Критерии оценок на курсовых экзаменах**

В экзаменационный билет рекомендуется включать не менее 3 вопросов, охватывающих весь пройденный материал, также в билетах могут быть задачи и примеры.

Ответы на все вопросы оцениваются максимум **100 баллами**.

**Критерии оценок** следующие:

- **100 баллов** – студент глубоко понимает пройденный материал, отвечает четко и всесторонне, умеет оценивать факты, самостоятельно рассуждает, отличается способностью обосновывать выводы и разъяснять их в логической последовательности.

- **90 баллов** - студент глубоко понимает пройденный материал, отвечает четко и всесторонне, умеет оценивать факты, самостоятельно рассуждает, отличается способностью обосновывать выводы и разъяснять их в логической последовательности, но допускает отдельные неточности.

- **80 баллов** - студент глубоко понимает пройденный материал, отвечает четко и всесторонне, умеет оценивать факты, самостоятельно рассуждает, отличается способностью обосновывать выводы и разъяснять их в логической последовательности, но допускает некоторые ошибки общего характера.

- **70 баллов** - студент хорошо понимает пройденный материал, но не может теоретически обосновывать некоторые выводы.

- **60 баллов** – студент отвечает в основном правильно, но чувствуется механическое заучивание материала.

- **50 баллов** – в ответе студента имеются существенные недостатки, материал охвачен «половинчато», в рассуждениях допускаются ошибки.

- **40 баллов** – ответ студента правилен лишь частично, при разъяснении материала допускаются серьезные ошибки.

- **20-30 баллов** - студент имеет общее представление о теме, но не умеет логически обосновать свои мысли.

- **10 баллов** - студент имеет лишь частичное представление о теме.

- **0 баллов** – нет ответа.

Эти критерии носят в основном ориентировочный характер. Если в билете имеются задачи, они могут быть более четкими.

**Шкала диапазона для перевода рейтингового балла в «5»-балльную систему:**

«0 – 50» баллов – неудовлетворительно

«51 – 65» баллов – удовлетворительно

«66 - 85» баллов – хорошо

«86 - 100» баллов – отлично

«51 и выше» баллов – зачет

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.**

а) основная литература:

1. Герасимов Я.И., Гейдерих В.А. Термодинамика растворов – М.: МГУ, 1980, 182 с.

2. Свелин Р.А. Термодинамика твёрдого состояния – М.: Металлургия, 1968, 314 с.

3. Глазов В.М., Земсков В.С. Физико-химические основы легирования полупроводников – М.: Наука !985, 371 с.

б) дополнительная литература

4. Глазов В.М., Павлова Л.Н. Химическая термодинамика и фазовые равновесия. – М.: Металлургия, 1981, 336 с.

5. Кубашевский О., Олкокк С.Б. Металлургическая термохимия. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982, 390 с.

6. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчёты в металлургии. Справочник – М.: Металлургия, 1985, 137 с.

### **9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

1. Федеральный портал «Российское образование» <http://www.edu.ru/>
2. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru/>
3. Теоретические сведения по физике и подробные решения демонстрационных вариантов тестовых заданий, представленных на сайте Росаккредагентства ([www.fero.ru](http://www.fero.ru)).
4. Российский портал «Открытого образования» <http://www.openet.edu.ru>
5. Сайт образовательных ресурсов Даггосуниверситета <http://edu.icc.dgu.ru>
6. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru) - Электронная библиотечная система «Университетская библиотека - online».
7. [www.iqlib.ru](http://www.iqlib.ru) - Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия
8. Информационные ресурсы научной библиотеки Даггосуниверситета <http://elib.dgu.ru> (доступ через платформу Научной электронной библиотеки [elibrary.ru](http://elibrary.ru)).
9. [www.affp.mics.msu.su](http://www.affp.mics.msu.su)

### **10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.**

Студент в процессе обучения должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы составляет по времени 30% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которым каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины.

Главное в период обучения своей специальности - это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтра. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Вид учебных занятий	Организация деятельности студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практических работах.
Практические занятия	Проработка рабочей программы, уделяя особое внимание целям и задачам структуре и содержанию дисциплины. Конспектирование источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы, работа с текстом. Решение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму и др.
Реферат	Поиск литературы и составление библиографии, использование от 3 до 5 научных работ, изложение мнения авторов и своего суждения по выбранному вопросу; изложение основных аспектов проблемы. Кроме того, приветствуется поиск информации по теме реферата в Интернете, но с обязательной ссылкой на источник, и подразумевается не простая компиляция материала, а

	самостоятельная, творческая, аналитическая работа, с выражением собственного мнения по рассматриваемой теме и грамотно сделанными выводами и заключением. Ознакомиться со структурой и оформлением реферата.
Подготовка к зачету	При подготовке к зачету необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу и др.

**11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.**

Чтение лекций с использованием мультимедийных презентаций. Использование анимированных интерактивных компьютерных демонстраций и практикумов-тренингов по ряду разделов дисциплины.

**12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Материально – техническая база кафедры экспериментальной физики, которая осуществляет подготовку по направлению 11.03.04 «**Электроника и наноэлектроника**», позволяет готовить бакалавров, отвечающих требованиям ФГОС. На кафедре имеются 3 учебных и 5 научных лабораторий, оснащенных современной технологической, измерительной и диагностической аппаратурой; в том числе функционирует проблемная НИЛ «Твердотельная электроника». Функционируют специализированные учебные и научные лаборатории: Физика и технология керамических материалов для твердотельной электроники, Физика и технология тонкопленочных структур, Электрически активные диэлектрики в электронике, Физическая химия полупроводников и диэлектриков.

Лекционные занятия проводятся в аудитории, оснащенной мультимедийным проекционным оборудованием и интерактивной доской.