

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИНГУШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКА

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель образовательной программы

Декан физико-математического факультета

_____/ Матиев А. Х.
от « 12 » 03 2025 г.

_____/ Кульбужев Б. С.
от « 14 » 03 2025 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)
Б1.В.ДВ.01.01 ТЕРМОДИНАМИКА КОНДЕНСИРОВАН-
НЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

(индекс дисциплины по учебному плану, наименование дисциплины (модуля))

Направление подготовки (*магистратура*)
03.04.02. Физика

Направленность (*профиль подготовки*)
Физика полупроводников

Квалификация выпускника
магистр

Форма обучения - очная

Магас, 2025

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью курса является изучение основ термодинамики конденсированных полупроводников для использования полученных знаний в высоких технологиях. Здесь рассматриваются основные закономерности, вытекающие из I, II. и III законов термодинамики. Лекционный курс и практические занятия помогут установить связь между термодинамическими величинами. Особое внимание акцентируется на некоторых термодинамических расчетах, концентрации дефектов в твердых телах, а также на информации, полученной из диаграмм состояния.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

1. поведение термодинамических величин при воздействии различных внешних факторов.
2. поведение материалов в различных условиях, что дает возможность избежать ошибок, связанных с незнанием термодинамических факторов.
3. степень протекания химической реакции, рассчитать концентрацию дефектов.

Излагаемый курс дает возможность комбинировать методы классической термодинамики и статистической физики, что является перспективным средством исследования кристаллов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП МАГИСТРАТУРЫ

Дисциплина «Термодинамика конденсированных полупроводников» входит в пакет дисциплин блока Б1.8.ДВ.01.01, формирующих фундаментальное образование магистров по направлению 03.04.02 Физика. Профиль «Физика полупроводников». В табл. 2.1 приведены названия предметов и разделов, которые необходимо усвоить для изучения дисциплины «Термодинамика конденсированных сред».

Дисциплина «Термодинамика конденсированных сред» является основной для изучения дисциплин: «Физики полупроводников», «Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов», «Физика полупроводниковых приборов», которые читаются параллельно или позже.

В табл. 2.1, 2.2 приведены названия предметов и разделов, которые необходимо усвоить для изучения дисциплины «Термодинамика конденсированных сред».

Связь дисциплины с предшествующими дисциплинами и сроки их изучения	
Таблица 2.1	
	Дисциплины, предшествующие дисциплине «Термодинамика конденсированных сред»
1	Вузовский курс физики
2	Вузовский математики
3	Физические основы вакуума
4	Материалы электронной техники

Связь дисциплины «Термодинамика конденсированных полупроводников» со смежными дисциплинами		Таблица 2.2
Дисциплина	Разделы, знание которых необходимо при изучении дисциплины	
Физика конденсированного состояния	Основные постулаты и положения квантовой теории; туннельный эффект; строение атома и связь с периодической системой элементов Менделеева; высокотемпературная сверхпроводимость и простейшие устройства на ее основе	
Физические Основы вакуума	Основы физики вакуума, тела; принципы и методы его получения.	
Физика полупроводников	Теоретические основы физики полупроводников, квантовые объяснения всех процессов происходящих в них при внешних воздействиях. Классификация твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики; основные электрические, магнитные и оптические свойства твердых тел, механизмы протекания тока	
Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов	Методы экспериментального получения и исследования параметров и характеристик материалов, твердотельной, нанoeлектроники. Технология изготовления элементов электронной техники. Основные тенденции развития электронной компонентной базы	

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ТЕРМОДИНАМИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД»

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению:

Таблица 3.1			
Код компетенции	Наименование компетенции	Индикатор достижения компетенции (закрепленный за дисциплиной)	В результате освоения дисциплины обучающийся должен:
УК-1	Системное и критическое мышление	ИДК _{УК-1.1} Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними	Знать основы молекулярной физики и термодинамики и методы системного и критического анализа; Уметь применять методы системного подхода и критического анализа проблемных ситуаций; Владеть методологией системного и критического анализа проблемных ситуаций.
		ИДК _{УК-1.2} . Использует естественно-научные знания при объяснении экспериментов, решения профессиональных задач.	Знает: источники и электронные базы данных для поиска требуемой информации Умеет: выявлять проблемные ситуации, используя методы анализа, синтеза и абстрактного мышления.

			Владеет: методами работы с источниками информации, включая технологии поиска специализированной информации
ПК-1	Научно-исследовательская деятельность	ИДК _{ПК1.1} самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической и экспериментальной физики; подбирать математический аппарат и самостоятельно решать различные задачи научных исследований, используя стандартные алгоритмы решения; объяснять (выявлять и строить) типичные модели решения поставленной задачи исследования; оценивать изменения в выбранной области исследования в связи с новыми данными, полученными из различных источников	Знает: методы и способы получения особо чистых материалов; Умеет: работать с современными научными установками по очистке полупроводниковых элементов, получению многокомпонентных полупроводниковых материалов. Владеет: навыками проведения физико-химических исследований полупроводниковых материалов;

4. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 4.1	
Виды учебной работы	Всего час/зач. ед.
Контактная работа (всего)	64/1,8
Лекции (Л)	32/0,9
Практические занятия (ПЗ)	32/0,9
Самостоятельная работа (всего)	53/1,5
Подготовка к практическим занятиям	26/0,7
Контроль самостоятельной работы	27/0,7
Вид отчетности	экзамен
Общая трудоёмкость	144/4

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 5.1

РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ В СЕМЕСТРЕ	Лекции,(часы)	Практические занятия (ПР), час	СРС единицы (часы)	Всего, час
РАЗДЕЛ I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ	10	16	26	44
1.1 Понятие теплоты	2	2	8	4
1.1.Термодинамические величины. Теплоемкость.	4	4	8	8
1.2. I, II, III начала термодинамики	4	4	10	8
РАЗДЕЛ II. РАСТВОРЫ	16	16	26	48
2.1. Понятие растворов.	2	2	8	
2.2. Типы растворов: газообразные, жидкие и твердые	2	2	8	
2.3. Состав растворов: двух компонентных, трех компонентных и много компонентных. Концентрация растворов.	6	6	10	12
2.4. Идеальные регулярные и концентрированные растворы	6	6		12
РАЗДЕЛ III. ДЕФЕКТЫ	6	4	28	14
Дефекты кристаллов и их типы	2	2	14	4
Контроль дефектов	2	2	14	4
Итого	32	32	40	106

5.2.Лекционные занятия

Таблица 5.1		
№ п/п	Номер лекции	Наименование раздела и темы дисциплины
1	2	3
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ		
1	1	Тема 1.1. Предмет термодинамики конденсированных сред. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия идеального газа и твердого тела. Энтальпия и ее физический смысл
		Тема 1.2. Теплоемкость при постоянном давлении и объеме.
2	2	Тема 1.3. Обратимые и необратимые, самопроизвольные и несамопроизвольные термодинамические процессы. Формулировка второго начала термодинамики
		Тема 1.4. Изменение энтропии при фазовых превращениях. Энтропия при необратимом процессе
3	3	Тема 1.5. Свободная энергия системы при постоянном объеме и давлении. Соотношения между некоторыми термодинамическими величинами
		Тема 1.6. Статистическая интерпретация энтропии. Энтропия смешения растворов (конфигурационная). Энтропия колебательного движения
4	4	Тема 7. Экспериментальное определение энтальпии и энтропии. Третье начало термодинамики

		Тема 8. Термодинамические потенциалы и равновесия в закрытых и открытых системах. Постулат Планка и следствия третьего начала термодинамики. Термодинамические потенциалы. Связь между ними, их производные
5	5	Тема 9. Химический потенциал. Химическое равновесие. Константы химического равновесия
		Тема 10. Понятие термодинамического сродства. Мера сродства по Гиббсу и Гельмгольцу. Вычисление парциальных мольных величин.
РАЗДЕЛ II. РАСТВОРЫ		
6	6	Тема 1. Идеальные растворы. Неидеальные разбавленные растворы.
		Тема 2. Концентрационные растворы. Избыточные термодинамические величины. Квазихимическая трактовка растворов
7	7	Тема 3. Применение квазихимической теории к идеальным и регулярным растворам. Фазовые равновесия
		Тема 4. Энтропия плавления полупроводников. Диаграмма энергии Гиббса – состав для двух компонентных систем
8	8	Тема 5. Фазовые превращения. Фазовые переходы первого и второго рода. Диаграммы фазового равновесия (диаграммы состояния). Правило фаз Гиббса
9	9	Тема 6. Эвтектическая реакция. Перетектическая реакция. Эвтетоидная диаграмма. Диаграмма для конгруэнтного и инконгруэнтного плавления. Метастабильная фаза. Эмпирические соотношения, характеризующие эвтектическую точку
10	10	Тема 7. Уравнение кривой ликвидуса для идеального раствора. Расчет кривой ликвидуса. Растворимость компонента в разных фазах
		Тема 8. Бинарные системы элементов III и V групп. Свободная энергия бинарных систем. Сравнение диаграмм состояния различного типа
11	11	Тема 9. Применение диаграмм состояния для получения монокристаллов и тонких пленок твердых растворов. Влияние подложки и материала растворителя на процесс жидкостной эпитаксии
РАЗДЕЛ III. ДЕФЕКТЫ		
12	12	Тема 10. Дефекты в кристаллах. Закон действующих масс и эффективные параметры констант равновесия. Константы равновесия с учетом процесса ионизации
13	13	Тема 11. Энергия Ферми – химический потенциал электронов в твердых телах. Условия электронейтральности. Доноры и акцепторы. Зависимость концентрации примеси от температуры. Ассоциации дефектов, их комплексы в элементарных полупроводниках германия и кремния
14	14	Тема 12. Закон действующих масс для комплексов. Расчет концентрации комплексов без учета ионизации. Дефекты в германии и кремнии. Нарушения стехиометрии. Дефекты. Общее уравнение, описывающее зависимость равновесной концентрации дефектов нестехиометрии в кристалле от температуры и давления
15	15	Тема 13. Отображение нарушения стехиометрии на диаграммах состояния. Термодинамика поверхности раздела. Элементы теории поверхности раздела. Уравнение адсорбции Гиббса. Влияние дислокаций на растворимость примесных атомов. Внешнее и внутреннее геттерирование. Две схемы формирования внутреннего геттера. Преципитаты.
16	16	ОБЗОРНАЯ ЛЕКЦИЯ

12	12	Тема 10. Дефекты в кристаллах. Закон действующих масс и эффективные параметры констант равновесия. Константы равновесия с учетом процесса ионизации
13	13	Тема 11. Энергия Ферми – химический потенциал электронов в твердых телах. Условия электронейтральности. Доноры и акцепторы. Зависимость концентрации примеси от температуры. Ассоциации дефектов, их комплексы в элементарных полупроводниках германия и кремния
14	14	Тема 12. Закон действующих масс для комплексов. Расчет концентрации комплексов без учета ионизации. Дефекты в германии и кремнии. Нарушения стехиометрии. Дефекты. Общее уравнение, описывающее зависимость равновесной концентрации дефектов нестехиометрии в кристалле от температуры и давления
15	15	Тема 13. Отображение нарушения стехиометрии на диаграммах состояния. Термодинамика поверхности раздела. Элементы теории поверхности раздела. Уравнение адсорбции Гиббса. Влияние дислокаций на растворимость примесных атомов. Внешнее и внутреннее геттерирование. Две схемы формирования внутреннего геттера. Преципитаты.
16	16	ОБЗОРНАЯ ЛЕКЦИЯ

5.3 Практические занятия

4-ой семестр			Таблица 5.2
№ п/п	Номер занятия	Наименование раздела	
		РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ	
1	1	Решение задач: 1.1, 1.2, 1.3	
2	2	Решение задач: 1.4, 1.5, 1.6	
3	3	Решение задач: 1.7, 1.8, 1.9	
4	4	Решение задач: 1.10, 1.11, 1.12	
5	5	Решение задач: 1.13, 1.14, 1.15	
6	6	Решение задач: 1.16, 1.17, 1.18, 1.19	
19	7	Решение задач: 1.20, 1.21, 1.22	
8	8	Решение задач: 1.23, 1.24, 1.25, 1.26	
9	9	Решение задач: 1.27, 1.28, 1.29	
		РАЗДЕЛ II. РАСТВОРЫ	
10	10	Решение задач: 2.1, 2.2, 2.3	
11	11	Решение задач: 2.4, 2.5, 2.6	
12	12	Решение задач: 2.7, 2.8, 2.9, 2.10	
		РАЗДЕЛ III. ДЕФЕКТЫ	
13	13	Решение задачи: 3.1.	
14	14	Решение задачи: 3.2.	
15	15	Продолжение решения задачи 3.1	
16	16	Зачетное занятие	
		Общее число часов 32	

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Некоторые темы выносятся на самостоятельное изучение. Изучение этих вопросов возможно с использованием электронного курса дисциплины, написанного самим автором (А.Х Матиев).

Перечень тем, выносимый для самостоятельной работы представлен в таблице 6.1.

6.1. План самостоятельной работы студентов

Таблица 6.1					
№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Кол. часов
1	Энтропия колебательного движения	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4
2	Химический потенциал. Химическое равновесие. Константы химического равновесия.	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4
3	Фазовые превращения. Фазовые переходы первого и второго рода	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4
3	Уравнение кривой ликвидуса для идеального раствора.	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4
4	Энергия Ферми – химический потенциал электронов в твердых телах.	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4
5	Ассоциация дефектов, их комплексы в элементарных полупроводниках германия и кремния	Написание конспекта	изучить	Электронный курс ТКП (А.Х Матиев).	4

6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Студент, используя электронное учебное пособие, а также вузовский учебник по Молекулярной физике и термодинамике изучает данный материал и составляет конспект конспекты в домашних условиях.

6.3. Контроль освоения компетенций

Таблица 6.2

№ п\п	Вид контроля	Контролируемые темы (разделы)	Компетенции, компоненты которых контролируются
1	Проверка конспектов	РАЗДЕЛ I. Основные понятия термодинамики	
2	Проверка конспектов	РАЗДЕЛ II. Растворы	
3	Проверка конспектов	РАЗДЕЛ III. Дефекты	

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

7.1. Примерный перечень вопросов, выносимых на экзамен

1. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия идеального газа и твердого тела. Энтальпия и ее физический смысл.
2. Теплоемкость при постоянном давлении и объеме.
3. Обратимые и необратимые, самопроизвольные и не самопроизвольные термодинамические процессы. Формулировка второго начала термодинамики.
4. Изменение энтропии при фазовых превращениях. Энтропия при необратимом процессе.
5. Свободная энергия системы при постоянном объеме и давлении.
6. Соотношения между некоторыми термодинамическими величинами.
7. Статистическая интерпретация энтропии. Энтропия смешения растворов (конфигурационная).
8. Энтропия колебательного движения.
9. Экспериментальное определение энтальпии и энтропии.
10. Третье начало термодинамики.
11. Термодинамические потенциалы и равновесия в закрытых и открытых системах.
12. Постулат Планка и следствия третьего начала термодинамики.
13. Термодинамические потенциалы. Связь между ними, их производные.
14. Химический потенциал. Химическое равновесие. Константы химического равновесия.
15. Понятие термодинамического сродства. Мера сродства по Гиббсу и Гельмгольцу
16. Вычисление парциальных мольных величин.
17. Идеальные растворы. Неидеальные разбавленные растворы.
18. Концентрационные растворы. Избыточные термодинамические величины.
19. Квазихимическая трактовка растворов.
20. Применение квазихимической теории к идеальным и регулярным растворам.
21. Фазовые равновесия.
22. Энтропия плавления полупроводников. Диаграмма энергии Гиббса – состав для двух компонентных систем.
23. Фазовые превращения. Фазовые переходы первого и второго рода.
24. Диаграммы фазового равновесия (диаграммы состояния). Правило фаз Гиббса.
25. Эвтектическая реакция. Перетектическая реакция. Эвтектическая диаграмма.
26. Диаграмма для конгруэнтного и incongruentного плавления. Метастабильная фаза.
27. Эмпирические соотношения, характеризующие эвтектическую точку.
28. Уравнение кривой ликвидуса для идеального раствора.
29. Расчет кривой ликвидуса.
30. Растворимость компонента в разных фазах.

31. Бинарные системы элементов III и V групп. Свободная энергия бинарных систем.
32. Сравнение диаграмм состояния различного типа.
33. Применение диаграмм состояния для получения монокристаллов и тонких пленок твердых растворов.
34. Влияние подложки и материала растворителя на процесс жидкостной эпитаксии.
35. Дефекты в кристаллах.
36. Закон действующих масс и эффективные параметры констант равновесия.
37. Константы равновесия с учетом процесса ионизации.
38. Энергия Ферми – химический потенциал электронов в твердых телах.
39. Условия электронейтральности. Доноры и акцепторы.
40. Зависимость концентрации примеси от температуры.
41. Ассоциация дефектов, их комплексы в элементарных полупроводниках германия и кремния.
42. Закон действующих масс для комплексов. Расчет концентрации комплексов без учета ионизации.
43. Дефекты в германии и кремнии. Нарушения стехиометрии. Дефекты.
44. Общее уравнение, описывающее зависимость равновесной концентрации дефектов нестехиометрии в кристалле от температуры и давления.
45. Отображение нарушения стехиометрии на диаграммах состояния.
46. Термодинамика поверхности раздела.
47. Элементы теории поверхности раздела. Уравнение адсорбции Гиббса.
48. Влияние дислокаций на растворимость примесных атомов. Внешнее и внутренне геттерирование.
49. Две схемы формирования внутреннего геттера. Преципитаты.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Методические рекомендации преподавателю

Термодинамика конденсированных сред представляет собой обширную, междисциплинарную и довольно сложную область знаний. Поэтому, чтобы донести материал до студента, необходимо уделять особое внимание систематичности, наглядности и доступности изложения. В настоящее время фактически существует мало учебников и пособий по данной дисциплине. Поэтому основная нагрузка ложится на лекции. Для изучения студентами данного курса в принципе достаточно знание основ молекулярной физики, термодинамики, основных начал статистической физики и основ высшей математики.

8.2 Методические рекомендации студентам

Для изучения студентами данного курса в принципе достаточно знание основ молекулярной физики, термодинамики, основных начал статистической физики и основ высшей математики.

Так как учебников и учебных пособий по данной дисциплине очень мало, то основная нагрузка ложится на лекции и их конспектирование. Для дополнительного изучения и самостоятельной работы предлагается использовать рекомендуемую литературу.

9. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. А.Х. Матиев. Термодинамика полупроводникового материаловедения. Учебное пособие магистров специальности «Физика». - Магас:, ИнГГУ, 2021 223 с.: ил.66. <https://disk.yandex.ru/i/FBafHQC11tGn7A>
2. В.И. Зиненко, В.П. Сорокин, П.П. Турчин. Основы физики твердого тела. Изд-во ФМ, Москва 2009, 335 с.
3. Р.Х. Дадашев Термодинамика поверхностных явлений. Изд-во ФМ, Москва 2008, 278 с.
4. Ч. Пул, Ф.Оуэнс, —Нанотехнологии, М., «Техносфера», 2008.
5. «Нанотехнологии в ближайшем десятилетии», под ред. М. Роко. М.. Мир. 2002.

Дополнительная литература

1. Н.Г. Хлебцов, В.А. Богатырев, Л.А. Дыкман, Б.Н. Хлебцов, "Золотые наноструктуры с плазмонным резонансом для биомедицинских исследований", Российские нанотехнологии, т.2 (3-4), 2009 (www.nanorf.ru).
2. S. Datta, —Electronic transport in mesoscopic systems, (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 7 1995).
3. S. Datta, —Quantum transport: atom to transistor, (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2005).

Рабочая программа дисциплины «Термодинамика конденсированных сред» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (магистратура) 03.04.02. Физика. Направленность (*профиль подготовки Физика полупроводников*), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от «07» 08 2021 г. № 914.

Программу составил: профессор кафедры «Физика» Матиев А.Х.

Программа одобрена на заседании кафедры «Физика»
Протокол № 8 от « 11 » марта 2025 года

Программа одобрена Учебно-методическим советом физико-математического факультета
Протокол № 7 от « 13 » марта 2025 года

Сведения о переутверждении программы на очередной учебный год и регистрации изменений

Учебный год	Решение кафедры (№ протокола, дата)	Внесенные изменения	Подпись зав. кафедрой