

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 10.08.2023 16:25:33
Уникальный программный ключ:
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«30»

мая

2023 г.



Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

Экспериментальные и расчетные методы
в физике конденсированного состояния

Направление подготовки

03.03.03 Радиоп физика

профиль

Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники

Для студентов

3 курса, очной формы обучения

Составитель:

Смирнов

Тверь, 2023

I. Аннотация

1. Цель и задачи дисциплины

Целью освоения дисциплины является:

Овладение основами и современным состоянием физики конденсированного состояния (ФКС) вещества. ФКС бурно развивается в последние годы и актуальна как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Эта область науки открывает широкие возможности для применения компьютерных методов, в том числе методов компьютерного моделирования. Наиболее разработанным разделом ФКС является физика твердого тела. Физика жидкого состояния, а также экспериментальные методы, используемые в ФКС, остаются вне поля зрения. Данный спецкурс восполняет в той или иной степени указанный пробел.

Задачами освоения дисциплины являются:

1. знакомство студентов с современными экспериментальными методами, включая рентгеноструктурный анализ и атомно-силовую микроскопию,
2. комплексное изучение основ физики твердого тела и физики жидкого состояния.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Экспериментальные и расчетные методы в физике конденсированного состояния» изучается в модуле «Физика и технология материалов радиоэлектроники» Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Физика конденсированного состояния, особенно физика твердого тела, очень тесно связана с целым рядом технических приложений. Можно даже сказать, что наша цивилизация является твердотельной, хотя в перспективе возможно изменение акцента в сторону физики жидкого состояния и наносистем. Соответственно, студентам, обучающимся по данной специальности, необходимо владеть основными понятиями ФКС и знать основные методы изучения структурных и иных характеристик конденсированных тел.

Поскольку данный предмет изучается на 3 курсе, он ориентирован на первоначальное знакомство с современными экспериментальными методами ФКС. Соответственно, данный курс не предполагает, что студенты самостоятельно проводят соответствующие экспериментальные исследования. Знакомство с экспериментальными установками осуществляется в основном в виде экскурсий в лаборатории физико-технического и химического факультетов. В задачу практикума входит изучение основ методов и обработка результатов спектроскопических и иных экспериментов.

3. Объем дисциплины: 3 зачетные единицы, 108 академических часов, в том числе:

контактная аудиторная работа: лекции 34 часа, лабораторные работы 34 часа;

самостоятельная работа: 40 часов.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов. УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.
ПК-4. Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы.	ПК-4.2. Применяет методы анализа научно-технической информации. ПК-4.3. Оформляет результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Зачет в 5 семестре.

6. Язык преподавания: русский.

II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.

1. Для студентов очной формы обучения

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Лабораторные работы		
		всего	в т.ч. ПП	всего	в т.ч. ПП	
1. Понятие о конденсированном состоянии вещества, особенности твердого и жидкого состояний. Агрегатные состояния вещества. Классификация конденсированных тел по типу химической связи. Особенности движения частиц в кристаллах и жидкостях. Понятие о ближнем и дальнем порядке. Раздельная функция распределения как количественная мера ближнего порядка в жидкостях	6	2				4
2. Основы кристаллографии. Набор операций симметрии. Примитивные ячейки. Основные типы кристаллографических решеток. Положение и ориентация плоскостей в кристаллах. Простые кристаллические структуры. Реальные кристаллические структуры.	13	4		4		5
3. Типы связей в кристаллах. Кристаллы инертных газов. Силы Ван дер Ваальса. Ионные кристаллы. Вычисления постоянной Маделунга. Объемный модуль упругости. Ковалентные кристаллы. Металлические кристаллы. Атомные радиусы.	13	4		4		5
4. Фононы и колебания решетки. Квантовый характер колебаний решетки. Неупругое рассеяние фотонов на акустических фононах. Локальные фононные колебания	14	4		6		4
5. Рассеяние рентгеновского излучения, электронов и нейтронов в жидкостях и твердых телах. Рассеяние рентгеновских лучей свободным электроном и свободным атомом. Рассеяние электронов свободным атомом. Рассеяние медленных нейтронов на свободном ядре. Параметры,	15	4		6		5

определения по кривым интенсивности. Определение парной корреляционной функции. Определение функций распределения электронной плотности для молекулярных жидкостей и аморфных тел.						
6. Исследование структуры жидкостей. Методы дифракции рентгеновских лучей. Общие уравнения дифракции. Аппаратура. Монохроматизация. Системы детектирования. Анализ данных, некоторые экспериментальные результаты.	14	4		6		4
7. Метод рассеяния нейтронов. Теория Ван Хофа. Временные корреляционные функции. Традиционные эксперименты. Исследование структуры металлов.	12	4		4		4
8. Электронография конденсированного вещества. Методологические особенности электронографии. Информация, получаемая из кривой интенсивности. Строение жидких металлов. Электронография поверхностных слоев.	11	4		2		5
9. Другие экспериментальные методы. Изучение конденсированных тел методом рассеяния света. Ультразвуковые методы. Ядерный магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Инфракрасная спектроскопия. Электронный микроскоп. Атомная силовая микроскопия. Туннельная микроскопия.	10	4		2		4
ИТОГО	108	34		34		40

III. Образовательные технологии

Учебная программа- наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
1. Понятие о конденсированном состоянии вещества, особенности твердого и жидкого состояний. Агрегатные состояния вещества. Классификация конденсированных тел по типу химической связи. Особенности движения частиц в кристаллах и жидкостях. Понятие о ближнем и дальнем порядке. Раздельная функция распределения как количественная мера ближнего порядка в жидкостях	<i>Лекции</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. дискуссия</i>
2. Основы кристаллографии. Набор операций симметрии. Примитивные ячейки. Основные типы кристаллографических решеток. Положение и ориентация плоскостей в кристаллах. Простые кристаллические структуры. Реальные кристаллические структуры.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
3. Типы связей в кристаллах. Кристаллы инертных газов. Силы Ван дер Ваальса. Ионные кристаллы. Вычисления постоянной Маделунга. Объемный модуль упругости.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных</i>

Ковалентные кристаллы. Металлические кристаллы. Атомные радиусы.		<i>задач</i>
4. Фононы и колебания решетки. Квантовый характер колебаний решетки. Неупругое рассеяние фотонов на акустических фононах. Локальные фононные колебания	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
5. Рассеяние рентгеновского излучения, электронов и нейтронов в жидкостях и твердых телах. Рассеяние рентгеновских лучей свободным электроном и свободным атомом. Рассеяние электронов свободным атомом. Рассеяние медленных нейтронов на свободном ядре. Параметры, определения по кривым интенсивности. Определение парной корреляционной функции. Определение функций распределения электронной плотности для молекулярных жидкостей и аморфных тел.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
6. Исследование структуры жидкостей. Методы дифракции рентгеновских лучей. Общие уравнения дифракции. Аппаратура. Монохроматизация. Системы детектирования. Анализ данных, некоторые экспериментальные результаты.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
7. Метод рассеяния нейтронов. Теория Ван Хоа. Временные корреляционные функции. Традиционные эксперименты. Исследование структуры металлов.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
8. Электронография конденсированного вещества. Методологические особенности электронографии. Информация, получаемая из кривой интенсивности. Строение жидких металлов. Электронография поверхностных слоев.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>
9. Другие экспериментальные методы. Изучение конденсированных тел методом рассеяния света. Ультразвуковые методы. Ядерный магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Инфракрасная спектроскопия. Электронный микроскоп. Атомная силовая микроскопия. Туннельная микроскопия.	<i>Лекции, лабораторные работы</i>	<i>Традиционная лекция Активное слушание. Дискуссия Решение индивидуальных задач</i>

IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации

Форма проведения экзамена: студенты, освоившие программу курса, могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой

аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

Для проведения текущей и промежуточной аттестации:

УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач:

УК-1.3. Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов.

УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.

Задание:

Подготовить и представить презентацию по одному из экспериментальных методов исследования конденсированных систем.

Способ аттестации: устный

Критерии оценки:

Высокий уровень (3 балла) - Презентация подготовлена на высоком уровне, ее представление также заслуживает высокой оценки.

Средний уровень (2 балла) - Презентация подготовлена на высоком уровне, но ее представление не заслуживает высокой оценки

Низкий уровень (1 балл) - Имеется ряд замечаний как по самой презентации, так и по ее представлению.

ПК-4. Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по отдельным разделам темы:

ПК-4.2. Применяет методы анализа научно-технической информации.

ПК-4.3. Оформляет результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Задание:

Используя справочную литературу, составить таблицу теплоёмкости простых веществ и сделать мотивированное заключение о степени выполнения закона Дюлонга и Пти.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- Задание выполнено аккуратно, проанализирована степень выполнимости закона Дюлонга и Пти – 3 балла
- Задание выполнено формально, отсутствует анализ выбранных табличных данных - 2 балла
- Задание выполнено формально и не вполне аккуратно – 1 балл

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

1) Рекомендуемая литература

а) Основная литература:

1. Матухин В. Л. Физика твердого тела [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Л. Матухин, В.Л. Ермаков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 224 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/262>.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 384 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/708>.

б) Дополнительная литература:

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 288 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2023>.

2. Владимиров Г.Г. Физика поверхности твердых тел [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71707>.

2) Программное обеспечение

а) Лицензионное программное обеспечение

Для выполнения практических заданий студентам рекомендуется самостоятельно выбрать привычную для них среду разработки программ. В качестве таковых студенты могут использовать среду разработки Delphi или Builder. В этом случае для визуализации вычислений студенты могут использовать пакет математической графики Origin.

С целью экономии времени студентам рекомендуется использовать математические пакеты Maple и Mathcad. Благодаря мощной интеллектуальной среде программирования студенты могут полностью сосредоточиться на разработке и исследовании математических моделей, минуя этап написания вспомогательных подпрограмм по дифференцированию интегрированию и т.д. Для быстрой выработки необходимых навыков использования этих пакетов к данному методическому комплексу прилагаются электронные учебники по данным пакетам.

Перечень программного обеспечения, разработанного на факультете

Программа для молекулярно-динамического моделирования процесса эпитаксиального роста (разработана В.М. Самсоновым и М.Ю. Пушкарем);

Программа для молекулярно-динамического моделирования эволюции малых систем (разработанная В.М. Самсоновым и В.В. Дронниковым);

б) Свободно распространяемое программное обеспечение

3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1.ЭБС«ZNANIUM.COM» www.znanium.com;

2.ЭБС «Университетская библиотека онлайн»<https://biblioclub.ru/>;

3.ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

1. Текущий контроль успеваемости

Вопросы для проверки знаний при освоении дисциплины:

1. Особенности структуры и движения атомов в жидкостях.
2. Радиальная функция распределения.
3. Разновидности решеточных теорий жидкости.
4. Природа межмолекулярных сил отталкивания.
5. Чем объясняется тепловое расширение кристаллов?
6. В чем заключаются основные отличия квантовой теории теплоемкости Дебая от теории Эйнштейна?
7. Закон Дюлонга и Пти.

Задачи для проверки умений при освоении дисциплины

Задание 1. Определение вращательной постоянной, момента инерции и межъядерного расстояния для двухатомных молекул

1. Познакомиться с основными положениями теории вращательных спектров на основе модели жесткого ротатора
2. На основе изученной теории вывести расчетные формулы для получения характеристических постоянных для изучаемого вещества.
3. Используя данные опыта по измерению волновых чисел для конкретного вещества, состоящего из двухатомных молекул, рассчитать вращательную постоянную, момент инерции и межъядерное расстояния.
4. Сравнить полученные результаты с имеющимися справочными данными, если таки существуют. Объяснить возможные расхождения.

Задание 2. Расчет частот первых линий во вращательном спектре поглощения двухатомной молекулы

1. Познакомиться с основными положениями теории вращательных спектров на основе модели жесткого ротатора.
2. На основе изученной теории вывести расчетные формулы для получения частот спектра по имеющимся характеристическим постоянным для изучаемого вещества.
3. По имеющимся характеристическим постоянным, для указанного преподавателем вещества, рассчитать частоты первых трех линий во вращательном спектре поглощения.
4. По полученным результатам сделать вывод о возможности применения той или иной области спектроскопии для изучения данной характеристики указанного вещества.

Задание 3. Изучение колебательно-вращательных спектров двухатомных

молекул

1. Познакомиться с основными положениями теории колебательно-вращательных спектров на основе модели не жесткого ротатора.
2. Вывести основные формулы для расчета термов колебательно-вращательных состояний.
3. Определить частоту колебаний и силовую постоянную для двухатомной молекулы, указанного преподавателем вещества, по известной постоянной центробежного растяжения и вращательной постоянной.
4. Оценить полученный результат.

Вопросы для проверки знаний при освоении дисциплины:

1. Классификация твердых тел по проводимости.
2. Основные положения зонной теории.
3. Собственная и примесная проводимости полупроводников. Понятие о дырке.
4. Основные материалы электронной техники: германий, кремний.
5. Полупроводниковые соединения.

Задачи для проверки умений при освоении дисциплины

Задание 1. Оценка изотопического эффекта в спектрах двухатомных молекул

1. Ознакомиться с теорией изотопов и влияние изотопозамещенных молекул на вращательный и колебательный спектр.
2. Найти массовое число изотопа, по известным из опыта первым линиям поглощения для указанного преподавателем вещества.
3. Найти смещение первой линии в спектре указанной преподавателем двухатомной молекулы при замещении одной из них более тяжелым изотопом.
4. Оценить влияние изотопического эффекта на молекулярные постоянные различных химических соединений.

Задание 2. Определение энергии диссоциации различными экспериментальными методами

1. Познакомится с различными методами оценки энергии диссоциации по экспериментальным данным.
2. Метод оценки по границе наблюдаемого электронно-колебательно-вращательного спектра.
3. Метод графической экстраполяции.
4. Оценить энергию диссоциации по имеющимся колебательным постоянным для указанного вещества.
5. Найти колебательное квантовое число, соответствующее энергии диссоциации молекулы вещества, определенной из опыта, которая ведет себя как гармонический осциллятор с известным коэффициентом жесткости.

Задание 3. Изучение принципиальной оптической схемы спектральных приборов

Основное назначение спектральных приборов – разложение электромагнитного излучения на его монохроматические составляющие. Спектральные приборы используются для качественного анализа спектрального состава излучения и выделения излучения данной длины волны.

1. Ознакомится с основными положениями теории линейной оптики.
2. Изучить принципиальное влияние элементов оптической схемы спектральных приборов на электромагнитное излучение видимого диапазона.
3. По указанию преподавателя построить оптическую схему необходимую для получения определенного оптического преобразования.

Задание 4. Изучение основных характеристик спектральных приборов

1. Ознакомится с основными положениями волновой теории.
2. Изучить характеристики спектральных приборов, с помощью которых их можно сравнивать и характеризовать. Спектральный диапазон. Дисперсия. Разрешающая способность. Светосила.

Задание 5. Рассмотрение основных типов спектральных приборов, их характеристик и применения

1. Изучить основные способы диспергирования света.
2. Сравнить возможности различных приборов: призмные спектральные приборы, дифракционные спектральные приборы, интерференционные спектральные приборы.
3. Рассмотреть основные классические и современные способы регистрации спектров полученных в спектральных приборах.
4. Определение качественного и количественного состава вещества по спектрам испускания, поглощения, отражения или рассеяния света. Изучение различных физико-химических свойств и строения веществ.

2. Промежуточная аттестация

Вопросы для проверки знаний при освоении дисциплины:

1. Понятие о конденсированном состоянии вещества.
2. Особенности твердого и жидкого состояний. Агрегатные состояния вещества.
3. Классификация конденсированных тел по типу химической связи.
4. Особенности движения частиц в кристаллах и жидкостях. Понятие о ближнем и дальнем порядке.

5. Основы кристаллографии.
6. Типы связей в кристаллах.
7. Фононы и колебания решетки.

Задачи для проверки умений при освоении дисциплины

Задача 1. Показать, что для потенциала Леннарда-Джонса $d = 1.12a$.

Задача 2. Показать, что из

$$U = \frac{1}{2} \sum \Phi(r_{ij}) = \frac{1}{2} N(4\varepsilon) \left[\sum_j \left(\frac{a}{r_{j1}} \right)^{12} - \sum_j \left(\frac{a}{r_{j1}} \right)^6 \right]$$

следует, что $r_1 < d$ и найти выражение, связывающее r_1 и a .

Задача 3. С использованием выражения $d = 1.12a$ для равновесного расстояния между ближайшими соседями, вывести формулу для энергии связи и сравнить результат с приближенной формулой

$$E_{\text{св}} = -U = \frac{1}{2} N(+\varepsilon) 12 = 6N\varepsilon$$

Задача 4. Вывести формулу

$$U = -\frac{N\alpha q^2}{R_0} \left(1 - \frac{\rho}{R_0} \right)$$

для полной энергии кристаллической решетки, где R_0 – равновесное расстояние между ближайшими соседями.

Задача 5. Рассчитать α для бесконечной цепочки ионов противоположного знака.

Задача 6. Пренебрегая вкладом сил отталкивания, оценить молярную энергию связи в монокристалле KCl. Равновесное расстояние между ближайшими соседями $R_0 = 3,147 \text{ \AA}$.

Задача 7. На кубический кристалл падает излучение с $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$. Отражение наблюдается при $\theta_{\text{min}} = 11^\circ$. Найти постоянную решетки d .

Вопросы для проверки знаний при освоении дисциплины:

1. Раздельная функция распределения как количественная мера ближнего порядка в жидкостях.
2. Рассеяние рентгеновского излучения, электронов и нейтронов в жидкостях и твердых телах.

3. Определение радиальной функции распределения из экспериментов по рассеянию рентгеновских лучей.
4. Исследование структуры жидкостей. Метод дифракции рентгеновских лучей.
5. Метод рассеяния нейтронов.
6. Электронография конденсированного вещества.
7. Другие экспериментальные методы.

Задачи для проверки умений при освоении дисциплины

Задача 1. Из выражения для энергии леннард-джонсовского кристалла

$$U = \frac{1}{2} \sum \Phi(r_{ij}) = \frac{1}{2} N(4\varepsilon) \left[\sum_j \left(\frac{a}{r_{ij}} \right)^{12} - \sum_j \left(\frac{a}{r_{ij}} \right)^6 \right]$$

получить формулу для энергии связи в допущении, что $r_1 = d$, и что учитывается взаимодействие только с ближайшими соседями.

Задача 2. Ионные кристаллы состоят из положительно и отрицательно заряженных ионов. Эти ионы сферически симметричны, а силами взаимодействия между ними являются центральные кулоновские силы и некие силы отталкивания, природа которых не может быть описана в рамках классической теории. Поэтому выражение для энергии взаимодействия ε_{ij} между двумя ионами i и j в кристалле состава XY, образованном из ионов с зарядами $+e$ и $-e$, содержит два члена и записывается так:

$$\varepsilon_{ij} = \pm \frac{e^2}{r_{ij}} + \frac{b}{r_{ij}^n},$$

где r_{ij} – расстояние между двумя разноименными ионами, а b и n – эмпирические константы.

Измеряя r_{ij} в единицах расстояния r между ближайшими соседями, т.е. полагая

$$r_{ij} = \alpha_{ij} r,$$

и суммируя по всем ионам при $j \neq i$, находи энергию ε_i -го иона в поле всех других ионов:

$$\varepsilon_i = -\frac{Ae^2}{r} + \frac{B}{r^n},$$

где

$$A = \sum_{j \neq i} \pm \alpha_{ij}^{-1}, \quad B = b \sum_{j \neq i} \alpha_{ij}^{-n}.$$

Если рассматриваемый i -ый ион заряжен отрицательно, то плюсы и минусы в последнем выражении для постоянной Маделунга A относятся соответственно к положительным и отрицательным ионам.

Из выражения для ε_i вытекает, что полная энергия решетки $U(r)$ кристалла, содержащего $2N$ ионов равна

$$U(r) = N\varepsilon_i = -N\left(\frac{Ae^2}{r} - \frac{B}{r^n}\right)$$

если предположить, что N достаточно велико, чтобы можно было пренебречь поверхностными эффектами.

Показать, что энергия решетки $U(r_0)$, соответствующая равновесному кратчайшему расстоянию между ионами $r = r_0$, задается в виде:

$$U(r_0) = -\frac{NAe^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

VII. Материально-техническое обеспечение

<p>Базовая учебная лаборатория общей физики. Лаборатория молекулярной физики № 211 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>1.Монитор 17" LG Flatron 1751SQ-SN Silver-Black 8ms TFT TCO 03 2 Принтер лазерный HP LJ 1005 (14 стр./мин) 3 Экран настенный Screen Media 153*203(M082-08150) 4 Экран настенный Screen Media 213*213(M082-08157) 5 Компьютер (DEPO Neos 420MD WP/OF Pro AE/E4600/2*1G/DDR667/160G/DV16/FDD/KVb/Монитор LCD BenQ17 6 Компьютер 7 Установка для определения определнния коэф. диффузии воздуха и водяного пара ФПТ 1-4 8 Установка для измерения теплоты парообразования ФПТ 1-10 9 Установка для определения</p>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise. MS Office 365 pro plus Kaspersky Endpoint Security для Windows Архиватор 7-Zip - бесплатно Acrobat Reader DC - бесплатно Google Chrome – бесплатно Unreal Commander - бесплатно Почта Outlook – бесплатно Origin 8.1 Sr2 - договор №13918/M41 от 24.09.2009 с ЗАО «СофтЛайн Трейд»;</p>
--	--	--

	<p>универсальной газовой постоянной ФПТ 1-12</p> <p>10 Установка для определения коэф. теплопроводности воздуха ФПТ 1-3</p> <p>11 Установка для определения коэффициента вязкости воздуха ФПТ 1-1</p> <p>12 Установка для определения энтропии при плавлении олова ФПТ 1-11</p> <p>13 Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры ФПТ 1-7</p> <p>14 Установка для исследования теплоёмкости твердого тела ФПТ 1-8</p> <p>15 Компьютер iRU Corp 510 I5- 2400/4096/500/G210-512/DVD- RW/W7S/монитор E-Machines E220HQVB 21.5" (2 шт)</p> <p>16 Установка для определения отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объёме ФПТ 1-6</p> <p>17 Уравнение состояния идеального газа с применением ПК</p> <p>18 Демонстрационный набор по термодинамике</p> <p>19 Установка для формирования и измерения температур МЛИ-2</p>	
--	---	--

VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			