

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**

решением ученого совета ННГУ  
протокол от "30" ноября 2022 г.  
№13

**Рабочая программа дисциплины  
«Избранные вопросы физики конденсированного состояния»**

Уровень высшего образования

**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Научные специальности

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика, 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика, 1.1.5. Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение, 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.4.1. Неорганическая химия, 1.4.2. Аналитическая химия, 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия, 1.4.7. Высокомолекулярные соединения, 1.4.8. Химия элементоорганических соединений, 1.5.11. Микробиология, 1.5.15. Экология, 1.5.2. Биофизика, 1.5.21. Физиология и биохимия растений, 1.5.5. Физиология человека и животных, 2.2.2. Электронная компонентная база микро и нанoeлектроники, квантовых устройств, 3.2.7. Аллергология и иммунология, 5.1.1. Теоретико-исторические правовые науки, 5.1.2. Публично-правовые (государственно-правовые) науки, 5.1.3. Частно-правовые (цивилистические) науки, 5.1.4. Уголовно-правовые науки, 5.1.5. Международно-правовые науки, 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.4. Финансы, 5.2.6. Менеджмент, 5.3.7. Возрастная психология, 5.4.2. Экономическая социология, 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы, 5.4.6. Социология культуры, 5.4.7. Социология управления, 5.5.2. Политические институты, процессы, технологии, 5.5.4. Международные отношения, глобальные и региональные исследования, 5.6.1. Отечественная история, 5.6.2. Всеобщая история, 5.6.7. История международных отношений и внешней политики, 5.7.1. Онтология и теория познания, 5.8.2. Теория и методика обучения и воспитания, 5.8.7. Методология и технология профессионального образования, 5.9.2. Литературы народов мира, 5.9.5. Русский язык. Языки народов России, 5.9.6. Языки народов зарубежных стран (с указанием конкретного языка или группы языков), 5.9.9. Медиакommunikации и журналистика

Нижегород  
2023 год

### 1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Избранные вопросы физики конденсированного состояния» относится к числу факультативных дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

**Цель дисциплины** – расширение знаний в области современной теории конденсированного состояния; овладение современными аналитическими и численными методами квантовой теории твердых тел и твердотельных структур.

#### Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

- **Знать** современное состояние исследований в области теории конденсированного состояния и твердотельных наноструктур;
- **уметь** использовать знания в области теории конденсированного состояния и твердотельных наноструктур для решения профессиональных задач;
- **владеть** современными аналитическими и численными методами квантовой теории твердых тел и твердотельных структур, в т.ч. с применением суперкомпьютерных технологий.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 64 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 64 часа типа), 64 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Всего
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторно-практические	Консультации		
Современные численные методы в теории наноструктур	16	14				14	2
Теория оптических явлений в наноструктурах	16	14				14	2
Теория двумерного электронного газа в квантующем магнитном поле	16	14				14	2
Электронные и спиновые явления в графене и топологических изоляторах	13	12				12	1
Проблемы твердотельных квантовых технологий и спинтроники	11	10				10	1
<b>Промежуточная аттестация:</b>	Зачет						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>64</b>				<b>64</b>	<b>8</b>

Таблица 3

## Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Современные численные методы в теории наноструктур	<p>Основные идеи распараллеливания вычислений при моделировании физических задач, организация операционных систем, методы передачи данных, работа на распределенных вычислительных системах. Параллельными процессы обработки данных, в которых одновременно могут выполняться несколько операций компьютерной системы. Суперкомпьютер. Изучение вычислительных система, обладающих предельными характеристиками по производительности. Кластеры, мультипроцессоры и мультимикомпьютеры. Современная архитектура.</p> <p>Задача рассеяния и динамика волновых пакетов в двумерной системе. Метод численного решения трехмерного уравнения Шредингера. Оценка ускорения. Практическая реализация на суперкомпьютере «Лобачевский». Практикум на компьютере. Решение базовых задач. Передача данных. MPI. OpenMP. Структура суперкомпьютера «Лобачевский». Программирование тестовых физических задач с применением технологий OpenMP и MPI. Технологии программирования на графических процессорах. Ускорение вычислений с помощью технологии CUDA. Программирование тестовых физических задач с применением технологии CUDA.</p>	Занятия лекционного и лабораторного типа	Подготовка обучающимися расчетных программ с применением суперкомпьютерных технологий по индивидуальному тематическим заданиям.
2.	Теория оптических явлений в наноструктурах	<p>Взаимодействие электромагнитного поля с веществом. Прямые и не прямые излучательные переходы. Роль электрон-фононного взаимодействия в процессе поглощения света непрямыми полупроводниками. Наноструктуры – квантовые ямы, нити (проволоки), точки, сверхрешетки. Использование приближения огибающей функции при описании электронных состояний в наноструктурах. Матричные элементы оператора электрон-фотонного взаимодействия для оптических переходов в наноструктурах. Правила отбора. Особенности оптических переходов в наноструктурах. Примесные и экситонные состояния в</p>	Занятия лекционного и семинарского типа	Презентации обучающимися докладов по индивидуальному тематическим заданиям

		наноструктурах – роль кулоновского взаимодействия.		
3.	Теория двумерного электронного газа в квантующем магнитном поле	Методы расчета электронных состояний в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках в перпендикулярном магнитном поле. Магнитотранспорт в двумерных сверхрешетках n-типа в магнитных полях. Квантовый целочисленный эффект Холла. Магнитооптические эффекты в двумерном электронном газе сверхрешетки. Влияние спин-орбитального взаимодействия на магнитооптические эффекты Керра и Фарадея.	Занятия лекционного и семинарского типа	Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям
4.	Электронные спиновые явления в графене и топологических изоляторах	Электронная структура графена. Уравнение Дирака для электронов в графене. Парадокс Клейна и особенности туннелирования в графене. Электронные состояния в графеновых нанолентах. Квантование Ландау для безмассовых Дираковских фермионов. Элементы теории топологических изоляторов. Обзор основных электронных и спиновых эффектов в топологических изоляторах и их приложений.	Занятия лекционного и семинарского типа	Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям
5.	Проблемы твердотельных квантовых технологий и спинтроники	Обзор современного состояния квантовых технологий и спинтроники в России и мире. Квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовая метрология. Физические основы квантовых вычислений и построения твердотельных квантовых вычислительных систем. Обзор состояния исследований твердотельных кубитов. Полупроводниковые кубиты. Джозефсоновские кубиты. Адиабатические квантовые вычисления. Спин-орбитальное взаимодействие как источник новых эффектов в твердотельных структурах. Основные механизмы энергетической и спиновой релаксации в твердотельных системах. Декогеренция в системах твердотельных кубитов. Принципы работы некоторых устройств спинтроники. Магнитная память.	Занятия лекционного и семинарского типа	Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям

#### 4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы,

подготовку устного доклада (публичного выступления), подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примерные темы для устного доклада (публичного выступления) приведены в п. 6.4 настоящей Рабочей программы дисциплины.

## **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

### **5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.**

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные экзаменаторами);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая лаконичности);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

### **Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме экзамена**

#### **Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

### **5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

5.2.1. При проведении экзамена обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Избранные вопросы физики конденсированного состояния»:

1. Основные идеи распараллеливания вычислений при моделировании физических задач.
2. Организация операционных систем.
3. Методы передачи данных.
4. Работа на распределенных вычислительных системах.
5. Стандарт OpenMP.
6. Стандарт MPI.
7. Структура кластера НИФТИ ННГУ.
8. Решение задачи рассеяния в квантовой механике. S-матрица.
9. Численное решение двумерного уравнения Шредингера.
10. Численное решение трехмерного уравнения Шредингера.
11. Что такое прямозонность и непрямозонность?
12. Как ведет себя статическая диэлектрическая функция металла для длинноволновых полей? Почему у полупроводника (диэлектрика) другое поведение диэлектрической функции?
13. Свойства динамической диэлектрической функции. Что такое временная дисперсия?
14. Почему межзонный переход должен быть прямым?
15. Связь амплитуды электрического поля в волне и количества фотонов.
16. Что такое экситон? Каков спектр экситона?
17. Акустические и оптические колебания в длинноволновом пределе.
18. Сколько фононов в основном состоянии кристаллической решетки?
19. Гамильтониан фононов в представлении вторичного квантования.
20. Суть модели «жестких ионов».
21. Какие бывают не прямые переходы в кремнии и германии?
22. Почему в не прямом переходе должны участвовать фотон и фонон?
23. Может ли быть прямым внутризонный переход в не прямозонном полупроводнике?
24. Зависимость коэффициента поглощения от частоты в прямозонном и не прямозонном полупроводнике.
25. Что такое квантовая яма, квантовая нить (проволока), квантовая точка?
26. Причина образования минизон в сверхрешетках.
27. Метод почти свободных электронов.
28. Метод сильно связанных электронов.
29. «Лестницы» уровней Ландау в полупроводниках.
30. Классификация состояний электрона в кристалле в магнитном поле.
31. Задача Харпера-Ховштадтера.
32. Состояния электронов в сверхрешетках в сильных магнитных полях. Методы расчета.
33. Типы спин-орбитального взаимодействия в твердых телах.
34. Правила отбора при поглощении ЭМИ газом носителей в магнитном поле.
35. Квантовый целочисленный эффект Холла в двумерном электронном газе сверхрешетки.
36. Магнитооптические эффекты Керра и Фарадея. Микроскопические механизмы формирования спин-орбитального взаимодействия.
37. Основные параметры некоторых видов спин-орбитального взаимодействия в полупроводниковых наноструктурах.
38. Основные механизмы энергетической релаксации при взаимодействии системы с термостатом.
39. Главные механизмы спиновой релаксации в полупроводниковых наноструктурах.
40. Принципы работы спинового диода и спинового транзистора.

41. Основные свойства топологических изоляторов.
42. Методы расчёта краевых состояний в топологических изоляторах.
43. Наблюдаемые в экспериментах эффекты и приложения топологических изоляторов.
44. Электронная структура графена. Уравнение Дирака для электронов в графене.
45. Туннелирование через прямоугольный потенциальный барьер в графене. Парадокс Клейна.
46. Электронные состояния в графеновых нанолентах.
47. Квантование Ландау для безмассовых Дираковских фермионов.
48. Дираковская частица в периодическом потенциале. Метод матрицы переноса.
49. Кубиты на примесях в кремнии.
50. Кубиты на полупроводниковых квантовых точках.
51. Джозефсоновские кубиты.

#### 5.2.2. Примерные темы индивидуальных заданий для подготовки докладов:

1. Оптические свойства кремниевых нанокристаллов.
2. Межподзонаное поглощение света в полупроводниковых квантовых ямах.
3. Безызлучательные электронные переходы в полупроводниковых структурах.
4. Эффект Рамана. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в полупроводниковых структурах.
5. Поляритоны в полупроводниковых квантовых ямах.
6. Примесное поглощение света в полупроводниках и полупроводниковых структурах.
7. Методы сильной и слабой связи.
8. Задача Харпера-Ховштадтера.
9. Двумерные полупроводниковые сверхрешетки и методы их получения.
10. Основные механизмы спин-орбитального взаимодействия в полупроводниковых наноструктурах.
11. Поглощение линейно поляризованного электромагнитного излучения электронным газом сверхрешетки в магнитном поле
12. Магнитооптические эффекты Керра и Фарадея в двумерном электронном газе двоякопериодической сверхрешетки.
13. Основные механизмы спин-орбитального взаимодействия в полупроводниковых наноструктурах.
14. Некоторые механизмы энергетической и спиновой релаксации при взаимодействии с термостатом.
15. Спиновый транзистор и спиновый диод как устройства спинтроники.
16. Расчёт краевых состояний для двумерных топологических изоляторов.
17. Расчёт краевых состояний для трёхмерных топологических изоляторов.
18. Баллистическая проводимость и дробовые шумы в графене.
19. Эффект Гуса-Хэнхен в графене.
20. Возникновение новых Дираковских точек в графеновых сверхрешетках.
21. Интерфейсные состояния в двумерных электронных системах с дираковским спектром.
22. Адиабатические квантовые вычисления.
23. Примеры кубитов на основе топологических изоляторов.
24. Оптически управляемые кубиты.

#### 5.2.3. Примеры индивидуальных заданий для разработки программ с применением суперкомпьютерных технологий:

1. Численное решение одномерной задачи рассеяния на прямоугольном потенциальном барьере.
2. Численное решение одномерной задачи рассеяния на прямоугольной потенциальной яме.
3. Численное решение двумерной задачи рассеяния на потенциальной яме.
4. Численное решение двумерной задачи рассеяния на потенциальном барьере.
5. Численное решение двумерного уравнения Шредингера в пустом пространстве.
6. Численное решение двумерного уравнения Шредингера в прямоугольном бильярде.
7. Численное решение трехмерного уравнения Шредингера в пустом пространстве.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **а) Основная литература:**

1. Гергель В.П., Баркалов К.А., Мееров И.Б., Сысоев А.В., Бастраков С.И. Параллельные вычисления. Технологии и численные методы: учеб. пособие : в 4 т. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. – 2013.  
Т. 1 – 239 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=455874>.  
Т. 2 – 367 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=455875>.  
Т. 3 – 415 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=455876>.  
Т. 4 – 369 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=455877>.
2. Воеводин В.В. – Вычислительная математика и структура алгоритмов: 10 лекций о том, почему трудно решать задачи на вычисл. системах параллел. архитектуры и что надо знать дополнительно, чтобы успешно преодолевать эти трудности : учеб. для студентов. – М. – 2010. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=445262>.
3. Денисенко М.В., Сатанин А.М. – Применение гетерогенных вычислительных систем и технологии CUDA для моделирования физических процессов. – Электронное учебно-методическое пособие. – Н. Новгород: Нижегородский государственный университет, 2012. – 53 с. (Электронная свободно доступная версия: [http://www.unn.ru/books/met\\_files/denisenko\\_satanin.doc](http://www.unn.ru/books/met_files/denisenko_satanin.doc)).
4. Дж. Займан. – Принципы теории твердого тела. – М.: Мир. – 1974. – 472 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=80063>
5. А.И. Ансельм. – Введение в теорию полупроводников. – СПб: Издательство "Лань". – 2016. – 624 с.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71742>
6. Киттель Ч. – Квантовая теория твердых тел. – М.: Наука, 1967. – 491 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=78911>
7. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. – Электронная теория металлов. – М.: Наука, 1971. – 416 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77342>
8. Перов А.А., Пенягин И.В. – Магнитные блоховские электронные состояния и спиновая поляризация в двумерных сверхрешетках без центра инверсии со спин-орбитальным взаимодействием Рашба в электронном газе // ЖЭТФ, Т. 145, вып. 3, С. 535–539 (2014). [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r\\_145\\_535.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_145_535.pdf)
9. Демиховский, В.Я. Магнитные блоховские состояния и холловская проводимость двумерного электронного газа в периодическом потенциале без центра инверсии / В.Я. Демиховский, А.А. Перов // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т. 76, вып. 10 – С. 723–728. [http://www.jetpletters.ac.ru/ps/606/article\\_9500.shtml](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/606/article_9500.shtml)
10. Demikhovskii, V.Ya. Hall conductance of a two-dimensional electron gas with spin-orbit coupling at the presence of lateral periodic potential / V.Ya. Demikhovskii, A.A. Perov // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – P. 205307. <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.75.205307>



11. Перов А.А., Пенягин И.В. Квантовые состояния носителей заряда и продольная проводимость двоякопериодических полупроводниковых решеточных структур n-типа в электрическом поле // ЖЭТФ, Т. 148, вып. 1(7), С. 127–132 (2015).  
[http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r\\_148\\_127.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_148_127.pdf)
12. Перов, А.А. «Магнитотранспорт и оптика полупроводниковых решеточных структур спинтроники» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 44 с. <http://phys.unn.ru/content.asp?contentid=3471>
13. Бычков, Ю.А. Свойства двумерного электронного газа со снятым вырождением спектра / Ю.А. Бычков, Э.И. Рашба // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39, № 2. – С. 66–69.  
[http://www.jetpletters.ac.ru/ps/77/article\\_1379.pdf](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/77/article_1379.pdf)
14. Перов, А.А. «Магнитопоглощение электромагнитного излучения двумерным электронным газом со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы в гетеропереходе с поверхностной сверхрешеткой» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 2. – С. 214–219.  
<http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/6763>
15. Перов, А.А. Электродинамический отклик носителей заряда в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках n-типа в постоянном однородном магнитном поле / А.А. Перов, А.С. Рульков, Е.А. Морозова, Е.В. Золина // ЖЭТФ. – 2017. – Т. 151, вып. 5. – С. 974–981. [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r\\_151\\_0974.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_151_0974.pdf)
16. Данилов, Ю.А., Демидов, Е.С., Ежевский, А.А. *Основы спинтроники*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2009. – 173 с. (Свободный доступ в сети Интернет: [http://www.unn.ru/books/met\\_files/spintronik.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf))
17. Хомицкий, Д.В. *Физические основы методов управления спиновой плотностью в наноструктурах спинтроники (учебно-методическое пособие)*. Фонд образовательных электронных ресурсов Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, 94 с. (Свободный доступ в сети Интернет: [http://phys.unn.ru/click\\_download.asp?contentid=3620](http://phys.unn.ru/click_download.asp?contentid=3620))
18. Zutic, I., Fabian, J., and Das Sarma, S. *Spintronics: Fundamentals and Applications* // Review of Modern Physics, 2004, V. 76, p. 323. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0405528>)
19. Katsnelson, M.I., Novoselov, K.S. *Graphene: new bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics* // Solid State Commun., 2007, V. 143, p. 3. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0703374.pdf>)
20. Das Sarma, S., Adam S., Hwang, E.H., Rossi, E. *Electronic transport in two-dimensional graphene* // Review of Modern Physics, 2011, V. 83, p. 407. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1003.4731>)
21. Vafeek, O., Vishmanath, A. *Dirac Fermions in Solids — from High Tc cuprates and Graphene to Topological Insulators and Weyl Semimetals* // Annual Review of Condensed Matter Physics, 2014, V. 5, p. 83. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1306.2272v1>)
22. Allain, P.E., Fuchs, J.-N. *Klein tunneling in graphene: optics with massless electrons* // The European Physical Journal B, V. 83, p. 301. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1104.5632v3.pdf>)

23. Castro Neto, A.N., Guinea, F., Peres, N.M.R., Novoselov, K.S., Geim, A.K. *The electronic properties of graphene* // Review of Modern Physics, 2009, V.81, p.109.  
(Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/0709.1163>)

б) Дополнительная литература:

1. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем. Учебное пособие – Нижний Новгород; Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2010. (Электронная свободно распространяемая версия: <http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/7.pdf>).
2. Мультипроцессорные системы и параллельные вычисления. – М.: Мир, 1976. – 383 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=261115>.
3. Дж. Займан. – Электроны и фононы. – М.: ИЛ. – 1962. – 488 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=80063>
4. Thouless, D.J. Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential / D.J. Thouless, M. Kohmoto, M.P. Nightingale, M. den Nijs // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 49, № 6. – P. 405–408. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.49.405>
5. Langbein, D. The tight-binding and nearly-free-electron approach to lattice electrons in external magnetic fields // Phys. Rev. – 1969. – Vol. 180, № 3. – P. 633–648. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.180.633>
6. Hofstadter, D.R. Energy levels and wave functions of Bloch electrons in rational and irrational magnetic field // Phys. Rev. B. – 1976. – Vol. 14. – P. 2239–2249. <link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevB.14.2239>
7. Claro, F.H. Magnetic subband structure of electrons in hexagonal lattices / F.H. Claro, G.H. Wannier // Phys. Rev. B. – 1979. – Vol. 19, № 12. – P. 6068–6074. <https://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.19.6068>
8. Dresselhaus, G. Spin-orbit coupling effects in zinc blende structures // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 100. – P. 580–586. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.100.580>
9. Žutić, I. Spintronics: fundamentals and applications / I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. – 2004. – Vol. 76. – P. 323–410. <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.76.323>
10. Ganichev, S.D. Experimental separation of Rashba and Dresselhaus spin splitting in semiconductor quantum well / S.D. Ganichev, V.V. Bel'kov, L.E. Golub, E.L. Ivchenko, Petra Schneider, S. Giglberger, J. Eroms, J. De Boeck, G. Borghs, W. Wegscheider, D. Weiss, and W. Prettl // Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 92. – P. 256601. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.92.256601>
11. Perov, A.A. Terahertz radiation-induced conductivity, Kerr and Faraday angles, and spin textures in a two-dimensional electron gas with spin-orbit coupling subjected to a high magnetic field and periodic potential / A.A. Perov, L.V. Solnyshkova, and D.V. Khomitsky // Phys. Rev. B. – 2010. – Vol. 82. – P. 165328. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.82.165328>
12. Уханов Ю.И. – Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77514>
13. Перов, А.А. «Магнитные блоховские состояния и транспорт носителей в двумерных полупроводниковых решеточных структурах со спин-орбитальным взаимодействием» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // Письма в ЖЭТФ. – 2008. - Т. 88. – С. 717–723. [http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1853/article\\_28291.shtml](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1853/article_28291.shtml)
14. Перов, А.А. Об эффектах Керра и Фарадея при воздействии терагерцового излучения на сверхрешетку со спин-орбитальным взаимодействием / А.А. Перов, Д.В. Хомицкий, Л.В. Солнышкова // Вестник ННГУ. – 2010. – № 5, вып. 2. – С. 36–38. [http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999 West 2010 5\(2\)/3.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999 West 2010 5(2)/3.pdf)

15. Звездин А.К., Котов В.А. – Магнитооптика тонких пленок. – М.: Наука, 1988. – 190 с.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=78385>
16. Демиховский В.Я. – Низкоразмерные структуры спинтроники. Курс лекций. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007. – 126 с. – Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=449220>
17. J. Sinova, S.O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, T. Jungwirth. – Spin Hall effects. – Rev. Mod. Phys. – Vol. 87. – P. 1213 (2015).  
<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.87.1213>
18. Fabian, J., Matos-Abiague, A., Ertler, C., Stano, P., Zutic, I. *Semiconductor spintronics* // Acta Physica Slovaca, 2007, V. 57, p. 565. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/0711.1461>)
19. Hasan, M.Z., Kane, C.L. *Colloquim: Topological Insulators* // Review of Modern Physics, 2010, V. 82, p. 3045. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1002.3895>)
20. Qi, X-L, Zhang, S-C., *Topological insulators and superconductors* // Review of Modern Physics, 2011, V.83, p.1057. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1008.2026>)
21. Wehling, T. O., Black-Schaffer, A. M., and Balatsky, A. V. *Dirac materials* // Advances in Physics, 2014, V. 76, p. 1. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1405.5774v1.pdf>)
22. Yamakage, Ai, Ezawa, M., Tanaka, Y., and Nagaosa N. *Charge transport in pn and npn junctions of silicene* // Physical Review B, 2013, V. 88, p. 085322. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1303.6599>)
23. Barbier, M., Vasilopoulos, P., and Peeters, F. M. *Extra Dirac points in the energy spectrum for superlattices on single-layer graphene* // Physical Review B, 2010, V. 81, p. 075438. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/1002.1442>)
24. Волков, Б.А., Панкратов, О.А. *Безмассовые двумерные электроны в инверсном контакте* // Письма в ЖЭТФ, 1985, т.42, с.145. (Свободный доступ в сети Интернет: [http://jetpletters.ac.ru/ps/99/article\\_16385.pdf](http://jetpletters.ac.ru/ps/99/article_16385.pdf))

#### в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. <http://www.nature.com/> – сайт Nature Publishing Group.
2. <http://journals.aps.org/rmp/> – сайт журнала Review of Modern Physics.
3. <http://journals.aps.org/prl/> – сайт журнала Physical Review Letters.
4. <http://journals.aps.org/prb/> – сайт журнала Physical Review B.
5. <http://iopscience.iop.org/0953-8984/> – сайт журнала Journal of Physics: Condensed Matter.
6. <http://jetpletters.ac.ru/> – сайт журнала «Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики».
7. <http://jetp.ac.ru/> – сайт «Журнала экспериментальной и теоретической физики».
8. [www.arxiv.org](http://www.arxiv.org) – сайт электронного архива Корнельского Университета со свободным доступом к публикациям.
9. <http://www.lib.unn.ru/> – интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ.
10. Пакеты компьютерных аналитических и графических вычислений для персонального компьютера Wolfram Mathematica и MathWorks MATLAB.
11. Программные среды Microsoft Visual Studio и Intel oneAPI.

#### 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания

оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;

- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
- лицензионное программное обеспечение: *Microsoft Windows, Microsoft Visual Studio, Intel oneAPI, Wolfram Mathematica, MathWorks MATLAB*;
- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Авторы:

Бастракова Марина Валерьевна \_\_\_\_\_

Бурдов Владимир Анатольевич \_\_\_\_\_

Конаков Антон Алексеевич \_\_\_\_\_

Максимова Галина Михайловна \_\_\_\_\_

Перов Анатолий Александрович \_\_\_\_\_

Хомицкий Денис Владимирович \_\_\_\_\_

Рецензент:

Павлов Дмитрий Алексеевич \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой:

Бурдов Владимир Анатольевич \_\_\_\_\_

Программа одобрена на заседании \_\_\_\_\_ 2022 года, протокол № б/н методической комиссии физического факультета от