

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  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_ г. № \_\_\_\_

**Рабочая программа дисциплины**

Теория спиновых явлений в полупроводниках

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

## **1. Место и цели дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Теория спиновых явлений в полупроводниках» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является дисциплиной по выбору, преподается на втором году обучения, в третьем семестре.

Целями освоения дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках» являются:

- овладение методами многозонной теории полупроводников и теории низкоразмерных систем, оптики и кинетики полупроводников при учете спин-орбитального взаимодействия, способствующей творческому использованию в теоретической и практической деятельности уже известных физических законов, а также восприятию и генерации новых физических идей;
- освоение студентами основных принципов спиновой физики твердого тела и физических следствий наличия спин-орбитального взаимодействия в твердотельных системах;
- знакомство с последними достижениями в областях спинтроники и квантовых вычислений;
- выработка у студентов практических навыков по решению задач теории полупроводников, теории низкоразмерных систем и квантовой теории твердого тела на примере систем со спин-орбитальным взаимодействием.

## **2. Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках» составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 74 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (38 часов самостоятельная работа в течение семестра, 36 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

Содержание дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В ТОМ ЧИСЛЕ				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
<b>1. Уравнение Дирака. Природа спин-орбитального взаимодействия.</b> Релятивистская квантовая механика как основа спиновой физики. Уравнение Дирака и уравнение Вейля. Разложение уравнения Дирака по степеням $1/c$ : преобразование Фолди-Ваутхайзена. Спин электрона. Эффект Зеемана. Спин-орбитальное взаимодействие и другие поправки $\sim 1/c^2$ . Спин-орбитальное взаимодействие в центрально-симметричном поле. Полный момент импульса в уравнении Дирака. Понятие о сложении моментов. Поправки к спектру водородоподобных ионов, связанные со спин-орбитальным взаимодействием.	11	2	2	–	4	7
<b>2. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках.</b> Влияние спин-орбитального взаимодействия на электронные состояния в невырожденной зоне. Спин-орбитальное взаимодействие и двойные группы симметрии. Влияние спин-орбитального взаимодействия на электронные состояния в вырожденной зоне. Спин-орбитальное расщепление. <b>k·p</b> -метод при учете спин-орбитального взаимодействия. Валентная зона кубических полупроводников при учете спин-орбитального взаимодействия. Гамильтониан Латтинджера. Гамильтониан Кейна 8 x 8.	11	2	2	–	4	7

Каноническое преобразование гамильтониана Кейна. Спин-орбитальное взаимодействие и симметрия уравнения Шредингера по отношению к обращению времени. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках без центра инверсии. Гамильтониан Дрессельхауза в объемных полупроводниках со структурой цинковой обманки. Спиновое расщепление в объемных полупроводниках в нулевом магнитном поле.						
<b>3. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.</b> Приближение огибающей при учете спин-орбитального взаимодействия. Граничные условия. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в двумерных системах (квантовых ямах). Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в одномерных системах (квантовых нитях). Структурная и интерфейсная асимметрия. Спин-орбитальное взаимодействие в присутствии внешнего поля. Спин-орбитальное взаимодействие Рашба в двумерных системах. Спиновое расщепление в двумерных системах в нулевом магнитном поле.	11	2	2	—	4	7
<b>4. Стационарные состояния электронов во внешнем магнитном поле.</b> Трехмерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай некантованного поля. $g$ -фактор электронов проводимости и влияние на него спин-орбитального взаимодействия. Формула Л.М. Рот. Случай сильного спин-орбитального взаимодействия и непараболичности зоны: $g$ -фактор как функция волнового вектора (на примере объемного антимонида индия). Трехмерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай кантованного поля. Магнитные подзоны. Двумерный электронный газ,	11	2	2	—	4	7

помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай неквантового поля. Расчет $g$ -фактора электронов в квантовых ямах. Двумерный электронный газ, помещенный во внешнее однородное магнитное поле: случай квантового поля. Уровни Ландау. Уровни Ландау в присутствии спин-орбитального взаимодействия Рашба.						
<b>5. Динамические и кинетические спиновые явления.</b> Оптическая ориентация электронных спинов в объемных полупроводниках и низкоразмерных структурах. Фотолюминесценция с поляризационным разрешением. Спиновая релаксация носителей в полупроводниках. Механизмы спиновой релаксации Эллиотта-Яфета и Дьяконова-Переля. Слабая антилокализация. Спиновая релаксация за счет неоднородности $g$ -фактора. Спин-зависимый транспорт в полупроводниках. Спиновый эффект Холла. Аномальный эффект Холла.	11	2	2	—	4	7
<b>6. Динамические и кинетические спиновые явления во внешнем магнитном поле.</b> Поглощение электромагнитного излучения: спиновый (парамагнитный) и циклотронный (диамагнитный) резонанс. Влияние инверсионной асимметрии на спиновый и циклотронный резонансы электронов проводимости. Ширина линии спинового и циклотронного резонанса. Магнетосопротивление. Осцилляции Шубникова-де Гааза и влияние на них спин-орбитального взаимодействия. Детектирование спинового расщепления в объемных полупроводниках и полупроводниковых структурах. Магнитооптические эффекты. Спектроскопия по методу «накачка-зондирование».	11	2	2	—	4	7
<b>7. Обменное и сверхтонкое взаимодействие в полупроводниках и полупроводниковых структурах.</b> Обменное взаимодействие в металлах. Прямой и косвенный обмен. $s$ - $d$	11	2	2	—	4	7

модель. Эффект Кондо. Разбавленные магнитные полупроводники. Осцилляции Рудермана-Киттеля. РККИ-взаимодействие. Спиновая релаксация носителей на магнитных примесях. Электрическая спиновая инжекция из ферромагнетиков в полупроводники. Обменное взаимодействие между электроном и дыркой. Тонкая структура уровней экситона. Спиновая релаксация Бира-Аронова-Пикуса. Сверхтонкое взаимодействие электронных и ядерных спинов. Взаимное влияние электронной и ядерной подсистем кристалла: сдвиги Найта и Оверхаузера, динамическая поляризация ядер. Спиновая релаксация электронов проводимости за счет сверхтонкого взаимодействия.						
<b>8. Избранные вопросы современной теории спиновых явлений.</b> Квантовый спиновый эффект Холла в двумерных системах. Двумерные и трехмерные топологические изоляторы. Спиновые кубиты на основе примесей в кремнии. Релаксация и декогеренция кубитов. Модель квантового компьютера Брюса Кейна.	11	2	2	–	4	7
<b>В т.ч. текущий контроль</b>	2	2				–
<b>Промежуточная аттестация – экзамен</b>						

### 3. Образовательные технологии

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) сопровождение лекций презентациями;
- 4) методика «вопросы и ответы»;
- 5) выполнение практического задания у доски;
- 6) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 7) работа в парах над практическим заданием;
- 8) работа в малых группах над практическим заданием;
- 9) методика «мозговой штурм».

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, 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, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

#### 5. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-2</b> Способен самостоятельно анализировать, не предвзято оценивать и ориентироваться в передовых теоретических концепциях и достижениях современной физики	(ПК-2) <b>Знать</b> основные принципы использования и области применимости теории спиновых явлений в конкретных задачах избранной области профессиональной деятельности.  (ПК-2) <b>Уметь</b> применять в профессиональной деятельности навыки постановки и решения задач, требующих применения теории спиновых явлений в полупроводниках.  (ПК-2) <b>Владеть</b> навыками теории спиновых явлений при решении задач в избранной области профессиональной деятельности.

#### 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

##### 6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

##### 6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

**«Плохо»** – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Неудовлетворительно»** – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Удовлетворительно»** – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

**«Хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Очень хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;



**«Отлично»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

**«Превосходно»** – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

### 6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Теория спиновых явлений в полупроводниках»:

1. Природа спин-орбитального взаимодействия.
2. Волновые функции в невырожденной зоне при учете спин-орбитального взаимодействия.
3. Вырожденная зона при учете спин-орбитального взаимодействия. Спин-орбитальное расщепление. Гамильтониан Латтинджера.
4. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в трехмерных кристаллах.
5. Спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауза в двумерных системах.
6. Спин-орбитальное взаимодействие Рашба в двумерных системах.
7. Фактор Ландэ электронов проводимости в объемных полупроводниках. Формула Л.М. Рот.
8. Уровни Ландау в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием Рашба.
9. Оптическая ориентация электронных спинов.
10. Механизм спиновой релаксации Дзяконова-Переля.
11. Механизм спиновой релаксации Эллиотта-Яфета.
12. Спиновый эффект Холла.
13. Электронный парамагнитный резонанс. Спиновый резонанс электронов проводимости.
14. Циклотронный резонанс.
15. Методы детектирования спинового расщепления в двумерных системах.
16. Прямое и косвенное обменное взаимодействие в металлах.  $s-d$  модель.
17. Разбавленные магнитные полупроводники. Взаимодействие Рудермана-Киттеля.

18. Сверхтонкое взаимодействие. Сдвиги Найта и Оверхаузера. Спиновая релаксация, связанная со сверхтонким взаимодействием.
19. Квантовый спиновый эффект Холла. Топологические изоляторы.
20. Кубиты на примесях в кремнии. Релаксация и декогеренция кубитов.

6.3.2. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

### **1. Уравнение Дирака. Природа спин-орбитального взаимодействия.**

- 1.1. Определить спин-орбитальное взаимодействие для электрона, помещенного в поле гармонической электромагнитной волны.
- 1.2. Выполнить разложение уравнения Дирака для релятивистского электрона в статическом электрическом поле вплоть до третьего порядка по степеням  $1/c$ .
- 1.3. Выполнить каноническое преобразование гамильтониана массивной вейлевской частицы, помещенной в слабое внешнее однородное электромагнитное поле.
- 1.4. Выполнить каноническое преобразование простейшей модели Кейна  $4 \times 4$  для кристаллов со структурой цинковой обманки: в рассмотрении всего 2 зоны – типа  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_{15}$ , влиянием всех остальных зон пренебрегается, а взаимодействие этих зон учитывается точно в линейных по импульсу слагаемых.
- 1.5. Определить общий вид двухрядной унитарной матрицы – элемента унитарной группы  $U(2)$ .

### **2. Спин-орбитальное взаимодействие в объемных полупроводниках.**

- 2.1. Определить, по каким неприводимым представлениям преобразуются блоховские функции квантовых состояний, которые смешиваются спин-орбитальным взаимодействием, в точке  $\Gamma$  структуры цинковой обманки; точке  $\Gamma$  структуры алмаза; точке  $\Gamma$  структуры вюрцита; точке  $L$  структуры алмаза; точке  $L$  структуры цинковой обманки; точке  $X$  структуры алмаза.
- 2.2. Получить явное выражение для оператора обращения времени в случае частицы со спином (орбитальным моментом)  $3/2$ .
- 2.3. Определить поправки к спектру водородоподобного донора в арсениде галлия, обусловленные спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза.
- 2.4. Используя модель Диммока, определить спин-орбитальное взаимодействие, индуцированное водородоподобной примесью донорного типа в селениде свинца.

### **3. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.**

- 3.1. Показать, что в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием хорошим квантовым числом

является проекция полного момента на ось, перпендикулярную плоскости газа.

- 3.2. Определить параметры Дрессельхауза в электронных подзонах в симметричной квантовой яме, выращенной в направлении  $[1\ 1\ 3]$ , на основе прямозонного полупроводника со структурой цинковой обманки.
  - 3.3. Рассчитать квантовые состояния в одномерной системе на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба. «Стенки» считать непроницаемыми.
  - 3.4. Рассчитать квантовые состояния в одномерной системе на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза. «Стенки» считать непроницаемыми.
  - 3.5. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба. Границу квантовой точки считать непроницаемой.
  - 3.6. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза. Границу квантовой точки считать непроницаемой.
- 4. Стационарные состояния электронов во внешнем магнитном поле.**
- 4.1. Определить однозонный  $g$ -фактор из двухзонной модели Диммока для халькогенидов свинца.
  - 4.2. Рассчитать уровни Ландау для двумерного электронного газа в симметричной квантовой яме  $[0\ 0\ 1]$  на основе полупроводника со структурой цинковой обманки, помещенного в перпендикулярное к плоскости ямы магнитное поле. Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
  - 4.3. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе двумерного электронного газа со спин-орбитальным взаимодействием Рашба, помещенной в перпендикулярное однородное магнитное поле. Границу квантовой точки считать непроницаемой.
- 5. Динамические и кинетические спиновые явления.**
- 5.1. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости по механизму Эллиотта-Яфета при рассеянии на короткодействующих ионизованных донорах в полупроводнике со структурой цинковой обманки в рамках модели Кейна  $8 \times 8$ .
  - 5.2. Рассчитать разницу в вероятностях рассеяния электронов со спином «вверх» и спином «вниз» при взаимодействии с короткодействующим ионизованным донором в объемном полупроводнике со структурой цинковой обманки.

- 5.3. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости по механизму Дьяконова-Переля при взаимодействии с длинноволновыми акустическими фононами в асимметричной кремниевой квантовой яме с ориентацией  $[111]$ . Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
- 6. Динамические и кинетические спиновые явления во внешнем магнитном поле.**
- 6.1. Рассчитать коэффициент циклотронного поглощения в зоне проводимости асимметричной кремниевой квантовой ямы с ориентацией  $[110]$  в перпендикулярном к плоскости ямы магнитном поле. Принять во внимание только одну подзону размерного квантования.
- 6.2. Определить частоту биений осцилляций Шубникова-де Гааза электронов в «одноподзонной» двумерной системе со спин-орбитальным взаимодействием, сформированной в симметричной квантовой яме арсенида индия, выращенной в направлении  $[113]$ . Учесть вклад в эффективный гамильтониан слагаемых не выше второго порядка по квазиволновому вектору.
- 7. Обменное и сверхтонкое взаимодействие в полупроводниках и полупроводниковых структурах.**
- 7.1. Определить поправки к энергии электрона, локализованного в сферической квантовой точке арсенида галлия с непроницаемой границей за счет сверхтонкого взаимодействия с ядрами. Рассмотреть случай как поляризованной, так и неполяризованной системы ядерных спинов.
- 7.2. Определить сдвиг частоты спинового резонанса для электрона, локализованного на водородоподобном доноре в 29 кремнии, за счет взаимодействия со спинами ядер. Рассмотреть случай как поляризованной, так и неполяризованной системы ядерных спинов.
- 8. Избранные вопросы современной теории спиновых явлений.**
- 8.1. Рассчитать топологически защищенные краевые состояния, формируемые на границе квантовой ямы  $\text{HgTe}/\text{CdTe}$ , используя модель Берневига-Хьюза-Жанга (BHZ). При расчете пренебречь асимметрией «частица-дырка».
- 8.2. Рассчитать квантовые состояния в цилиндрической квантовой точке на основе поверхности трехмерного топологического изолятора. Считать, что частица полностью локализована внутри точки.
- 8.3. Показать в явном виде, что взаимодействие с фононами нарушает топологическую защищенность краевых состояний в режиме квантового спинового эффекта Холла.

8.4. Оценить скорость декогеренции кубитов на основе локализованных на примесях электронных спинов в результате обменного взаимодействия между различными кубитами.

6.3.3. Примеры индивидуальных задач повышенной сложности для самостоятельной работы:

1. Используя метод эмпирического псевдопотенциала, определить зонную структуру арсенида галлия при учете спин-орбитального взаимодействия.
2. Используя метод эмпирического псевдопотенциала, определить структуру блоховских функций в кремнии при учете спин-орбитального взаимодействия.
3. Определить параметр Рашба в электронных подзонах в квантовой яме  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ .
4. Определить коэффициент непрямого поглощения правополяризованного электромагнитного излучения в германии.
5. Рассчитать скорость спиновой релаксации электронов проводимости в германии по механизму Эллиотта-Яфета при рассеянии на фононах, принимая во внимание только внутримолекулярные процессы рассеяния.
6. Рассчитать туннельный ток спин-поляризованных электронов через металлическую гранулу в условиях обменной блокады.
7. Рассчитать двумерную зонную структуру на поверхности трехмерного топологического изолятора со структурой теллурида висмута.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Аплеснин С.С. – Основы спинтроники: Учебное пособие. 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 288 с.  
ЭБС «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/551>.
2. Ансельм А.И. – Введение в теорию полупроводников: Учебное пособие. – 4е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 624 с.  
ЭБС «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/71742>.

б) дополнительная литература:

1. Уайт Р.М. – Квантовая теория магнетизма.  
М.: Мир, 1985. – 303 с.  
Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=75264>.  
М.: Мир, 1972. – 306 с.  
Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=94723>.
2. 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>.
3. Сликтер Ч.П. – Основы теории магнитного резонанса. – М.: Мир, 1981. – 448 с.  
Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77774>.
4. Оптическая ориентация – под ред. Захарчени Б.П. и Майера Ф. – Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1989. – 408 с.  
Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 2 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=75194>.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ  
<http://www.lib.unn.ru/>.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры теоретической физики

физического факультета,

к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_ / Конаков А.А. /

Рецензент(ы):

Зав. кафедрой теоретической физики

физического факультета,

д. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_ / Бурдов В.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года, протокол № б/н.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ

\_\_\_\_\_ / Перов А.А. /