

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Д. А. Таюрский

» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

## **Программа дисциплины**

Теоретические основы спинтроники

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Теоретическая и математическая физика

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2016

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий
  - 4.1. Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)
  - 4.2. Содержание дисциплины (модуля)
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)
6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)
7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)
11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)
12. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья
13. Приложение №1. Фонд оценочных средств
14. Приложение №2. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
15. Приложение №3. Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Деминов Р.Г. (Кафедра теоретической физики, Отделение физики), Raphael.Deminov@kpfu.ru Заяц А.Е.

### 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль), должен обладать следующими компетенциями:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-1	способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
ОПК-5	способностью использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки
ОПК-6	способностью использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе
ПК-1	способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль):

Должен знать:

теоретические основы спинтроники

Должен уметь:

использовать знание теоретических основ спинтроники при анализе различных спин-зависимых эффектов

Должен владеть:

навыками вычисления спин-зависимых свойств различных систем

Должен демонстрировать способность и готовность:

к дальнейшему обучению

### 2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Данная дисциплина (модуль) включена в раздел "Б1.В.ДВ.4 Дисциплины (модули)" основной профессиональной образовательной программы 03.04.02 "Физика (Теоретическая и математическая физика)" и относится к дисциплинам по выбору.

Осваивается на 1 курсе в 1, 2 семестрах.

### 3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных(ые) единиц(ы) на 216 часа(ов).

Контактная работа - 54 часа(ов), в том числе лекции - 36 часа(ов), практические занятия - 18 часа(ов), лабораторные работы - 0 часа(ов), контроль самостоятельной работы - 0 часа(ов).

Самостоятельная работа - 126 часа(ов).

Контроль (зачёт / экзамен) - 36 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины: отсутствует в 1 семестре; экзамен во 2 семестре.

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

##### 4.1 Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)

N	Разделы дисциплины / модуля	Семестр	Виды и часы контактной работы, их трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Скалярные и векторные поля. Взаимодействие полей с внешними источниками.	1	2	0	0	6
2.	Тема 2. Калибровочное взаимодействие в скалярной электродинамике.	1	2	0	0	6
3.	Тема 3. Неабелевы калибровочные поля. Уравнения поля.	1	2	0	0	6
4.	Тема 4. Решения уравнений поля. Условия самодуальности	1	2	0	0	6
5.	Тема 5. Инстантоны. Топологический заряд.	1	2	0	0	6
6.	Тема 6. Спонтанное нарушение глобальной симметрии. Намбу-голдстоуновский бозон. Теорема Голдстоуна.	1	2	0	0	6
7.	Тема 7. Механизм Хиггса.	1	2	0	0	6
8.	Тема 8. Монополь в модели Янга-Миллса-Хиггса. Самодуальный монополь.	1	2	0	0	6
9.	Тема 9. Простейшие топологические солитоны. Кинк. Вихрь.	1	2	0	0	6
10.	Тема 10. Введение в спинтронику.	2	2	2	0	6
11.	Тема 11. Теория транспорта в немагнитных металлах и полупроводниках.	2	2	2	0	8
12.	Тема 12. Рассеяние на магнитных примесях.	2	2	2	0	8
13.	Тема 13. Транспорт в низкоразмерных системах.	2	4	4	0	14
14.	Тема 14. Транспорт в магнитных системах.	2	2	2	0	8
15.	Тема 15. Локализация.	2	2	2	0	8
16.	Тема 16. Кулоновское взаимодействие.	2	2	2	0	8
17.	Тема 17. Спин-зависимое туннелирование в магнитных наноструктурах.	2	2	2	0	12
	Итого		36	18	0	126

##### 4.2 Содержание дисциплины (модуля)

###### Тема 1. Скалярные и векторные поля. Взаимодействие полей с внешними источниками.

Скалярные и векторные поля. Действие скалярного поля. Массивное скалярное поле. Комплексное скалярное поле. Взаимодействие полей с внешними источниками. Взаимодействующие поля.

###### Тема 2. Калибровочное взаимодействие в скалярной электродинамике.

Калибровочное взаимодействие в скалярной электродинамике. Теорема Нетер.

###### Тема 3. Неабелевы калибровочные поля. Уравнения поля.

Неабелевы калибровочные поля. Неабелевы глобальные симметрии. Неабелева калибровочная инвариантность и калибровочные поля:

группа  $SU(2)$ . Обобщения на другие группы. Уравнения Янга-Миллса.

#### **Тема 4. Решения уравнений поля. Условия самодуальности**

Параллельные калибровочные поля. Условие самодуальности в евклидовом пространстве.

#### **Тема 5. Инстантоны. Топологический заряд.**

Понятие инстантона в калибровочной теории. Инстантон Белавина-Полякова-Шварца-Тюпкина. Топологический заряд.

#### **Тема 6. Спонтанное нарушение глобальной симметрии. Намбу-голдстоуновский бозон. Теорема Голдстоуна.**

Спонтанное нарушение глобальной симметрии. Спонтанное нарушение дискретной симметрии. Спонтанное нарушение глобальной симметрии  $U(1)$ .

Намбу-голдстоуновский бозон. Частичное нарушение симметрии: модель  $SO(3)$ . Общий случай. Теорема Голдстоуна.

#### **Тема 7. Механизм Хиггса.**

Механизм Хиггса. Пример абелевой модели. Неабелев случай: модель с полностью нарушенной  $SU(2)$ -симметрией. Пример частичного нарушения

калибровочной симметрии: бозонный сектор стандартной электрослабой теории.

#### **Тема 8. Монополю в модели Янга-Миллса-Хиггса. Самодуальный монополю.**

Понятие монополя в калибровочной теории. Монополю 'т Хоффа-Полякова. Самодуальный монополю Прасада-Соммерфильда.

#### **Тема 9. Простейшие топологические солитоны. Кинк. Вихрь.**

Простейшие топологические солитоны. Кинк. Масштабные преобразования и теоремы об отсутствии солитонов. Вихрь. Солитон в модели  $n$ -поля в  $(2+1)$ -мерном пространстве-времени.

#### **Тема 10. Введение в спинтронику.**

Спинтроника. Магнетосопротивление. Гигантское магнетосопротивление (GMR) и туннельное магнетосопротивление (TMR).

#### **Тема 11. Теория транспорта в немагнитных металлах и полупроводниках.**

Классическая теория Друде-Лоренца. Кинетическое уравнение Больцмана. Магнетосопротивление металлов и полупроводников. Эффект Холла. Метод функций Грина. Формула Кубо для проводимости. Зарядовый и спиновый токи. Спиновый эффект Холла.

#### **Тема 12. Рассеяние на магнитных примесях.**

Эффект Кондо на магнитных примесях и резонанс Абрикосова-Сула. Спин-орбитальное взаимодействие. Спиновая релаксация.

#### **Тема 13. Транспорт в низкоразмерных системах.**

Двумерный электронный газ. Квантовые ямы, проволоки и точки. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах. Баллистический транспорт. Эффект Ааронова-Бома в нанокольцах. Квантование холловской проводимости в одномерных системах.

#### **Тема 14. Транспорт в магнитных системах.**

Спин-зависимое рассеяние. Гигантское магнетосопротивление

#### **Тема 15. Локализация.**

Локализация Андерсона. Локализация в магнитных системах.

#### **Тема 16. Кулоновское взаимодействие.**

Кулоновское взаимодействие в одномерных системах. Эффект кулоновской блокады.

## **Тема 17. Спин-зависимое туннелирование в магнитных наноструктурах.**

Туннельное магнетосопротивление. Модели Жулиера, Стирнса и Слончевского. Обобщенная модель Слончевского. Зависимость туннельного магнетосопротивления от температуры и приложенного напряжения.

### **5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)**

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Организация самостоятельной работы обучающихся регламентируется нормативными документами, учебно-методической литературой и электронными образовательными ресурсами, включая:

Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 5 апреля 2017 года №301)

Письмо Министерства образования Российской Федерации №14-55-996ин/15 от 27 ноября 2002 г. "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений"

Устав федерального государственного автономного образовательного учреждения "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Правила внутреннего распорядка федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Локальные нормативные акты Казанского (Приволжского) федерального университета

Дёминов Р.Г. Электронный транспорт в твёрдых телах. - <http://kpfu.ru/portal/docs/F1572935065/ETSS.pdf>

### **6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)**

Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) включает оценочные материалы, направленные на проверку освоения компетенций, в том числе знаний, умений и навыков. Фонд оценочных средств включает оценочные средства текущего контроля и оценочные средства промежуточной аттестации.

В фонде оценочных средств содержится следующая информация:

- соответствие компетенций планируемым результатам обучения по дисциплине (модулю);
- критерии оценивания сформированности компетенций;
- механизм формирования оценки по дисциплине (модулю);
- описание порядка применения и процедуры оценивания для каждого оценочного средства;
- критерии оценивания для каждого оценочного средства;
- содержание оценочных средств, включая требования, предъявляемые к действиям обучающихся, демонстрируемым результатам, задания различных типов.

Фонд оценочных средств по дисциплине находится в Приложении 1 к программе дисциплины (модулю).

### **7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

Освоение дисциплины (модуля) предполагает изучение основной и дополнительной учебной литературы. Литература может быть доступна обучающимся в одном из двух вариантов (либо в обоих из них):

- в электронном виде - через электронные библиотечные системы на основании заключенных КФУ договоров с правообладателями;

- в печатном виде - в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского. Обучающиеся получают учебную литературу на абонементе по читательским билетам в соответствии с правилами пользования Научной библиотекой.

Электронные издания доступны дистанционно из любой точки при введении обучающимся своего логина и пароля от личного кабинета в системе "Электронный университет". При использовании печатных изданий библиотечный фонд должен быть укомплектован ими из расчета не менее 0,5 экземпляра (для обучающихся по ФГОС 3++ - не менее 0,25 экземпляра) каждого из изданий основной литературы и не менее 0,25 экземпляра дополнительной литературы на каждого обучающегося из числа лиц, одновременно осваивающих данную дисциплину.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля), находится в Приложении 2 к рабочей программе дисциплины. Он подлежит обновлению при изменении условий договоров КФУ с правообладателями электронных изданий и при изменении комплектования фондов Научной библиотеки КФУ.



## **8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Bruno P. Quantum transport in nanostructures: a panorama. Lecture course: winter semester, 2003/2004 - [http://www1.mpi-halle.mpg.de/~bruno/lectures/quantum\\_transport/quantum\\_transport.html](http://www1.mpi-halle.mpg.de/~bruno/lectures/quantum_transport/quantum_transport.html)

Dugaev V.K. Spin-dependent transport theory. Lecture course: winter semester, 2004/2005 - <http://cfif.ist.utl.pt/~vdugaev/lectures.htm>

Levy P.M. Transport in solids. Doctoral level course. Orsay, March 2005 - <http://ebookbrowse.com/transport-course-2005-5-ppt-d14201864>

Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. Основы спинтроники. Н. Нов-город: Изд-во ННГУ, 2009  
Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. Основы спинтроники. Н. Нов-город: Изд-во ННГУ, 2009 - [www.unn.ru/books/met\\_files/spintronik.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf)

Заяц А.Е. Введение в теорию классических калибровочных полей - <http://www.kpfu.ru/docs/F382346128/Metodichka1.pdf>

Заяц А.Е. Классические калибровочные поля и их симметрии - <http://www.kpfu.ru/docs/F382346128/Metodichka2.pdf>

МФТИ / Кафедра теоретической физики / Библиотека / Учебно-методические пособия - <http://theorphys.mipt.ru/biblio/metodichki.html>

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Методические рекомендации по самостоятельной работе студентов

Тема Транспорт в низкоразмерных системах

Вопрос 1.

Эффект Ааронова-Бома. Квантовый эффект Холла.

Эффект Ааронова-Бома связан с непосредственным проявлением потенциалов электромагнитного поля (векторного потенциала). Важно различать 'классический' эффект Ааронова-Бома, когда на пути движения электронов магнитного поля нет, а векторный потенциал отличен от нуля, и 'твердотельный' эффект Ааронова-Бома, когда мезоскопическое проводящее кольцо находится в магнитном поле и меняется магнитный поток через площадь кольца, что приводит к осцилляциям тока через это кольцо.

Квантовый эффект Холла - эффект квантования холловского сопротивления или проводимости двумерного электронного газа в сильных магнитных полях и при низких температурах. Квантовый эффект Холла (КЭХ) был открыт Клаусом фон Клитцингом (совместно с Г. Дордой и М. Пеппером) в 1980 году. Эффект состоит в том, что при достаточно низких температурах в сильных магнитных полях на зависимости поперечного сопротивления (отношения возникающего поперечного напряжения к протекающему продольному току) вырожденного двумерного электронного газа (ДЭГ) от величины нормальной составляющей к поверхности ДЭГ индукции магнитного поля (или от концентрации при фиксированном магнитном поле) наблюдаются участки с неизменным поперечным сопротивлением или 'плато'.

Тема Транспорт в магнитных системах

Вопрос 2.

Теория гигантского магнетосопротивления.

Гигантское магнетосопротивление, ГМС (англ. Giant MagnetoResistance, GMR) - квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагничённости соседних магнитных слоёв. Направлением намагничённости можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина. За открытие гигантского магнетосопротивления в 1988 году физики Альбер Ферт (Университет Париж-юг XI) и Петер Грюнберг (Исследовательский центр Юлих) были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году.

Тема Локализация

Вопрос 3.

Локализация Андерсона. Локализация в магнитных системах.

Андерсоновская локализация (АЛ) - явление, возникающее при распространении волн в среде с пространственными неоднородностями и состоящее в том, что вследствие многократного рассеяния на неоднородностях и интерференции рассеянных волн становится невозможным распространение бегущих волн; колебания приобретают характер стоячей волны, сконцентрированной (локализованной) в ограниченной области пространства. АЛ возможна для волн любой природы, но особенно ярко она проявляется в случае волн де Бройля для частиц и квазичастиц при изучении кинетических свойств (электропроводности, теплопроводности) неупорядоченных твёрдых сред (аморфные вещества, сильно легированные полупроводники и др.), т. к. при АЛ подвижность частиц равна 0. Представление о возможности локализации частиц и квазичастиц в неупорядоченных системах было впервые выдвинуто в 1958 Ф. У. Андерсоном (Ph. W. Anderson). С его именем и именем Н. Ф. Мотта (N. F. Mott) связаны как введение этих понятий в физику аморфных проводников, так и дальнейшее развитие.

Тема Кулоновское взаимодействие

Вопрос 4.

Кулоновское взаимодействие в одномерных системах.

Вопрос 5.

Эффект кулоновской блокады.

Кулоновская блокада - блокирование прохождения электронов через квантовую точку, включённую между двумя туннельными контактами, обусловленное отталкиванием электронов в контактах от электрона на точке, а также дополнительным кулоновским потенциальным барьером, который создаёт электрон, усевшийся на точке. Аналогично тому, как поле ядерных сил при альфа распаде препятствует вылету альфа-частицы, кулоновский барьер препятствует вылету электрона из точки, а также попаданию новых электронов на неё. Экспериментально кулоновская блокада проявляется как пикообразная зависимость проводимости точки от потенциала точки, то есть от напряжения на дополнительном электроде (затворе). Это явление наблюдается тогда, когда кулоновская энергия  $e^2/2C$  (обусловленная даже одним электроном с зарядом  $e$ ;  $C$ -ёмкость точки) квантовой точки заметно больше, чем температура и расстояние между уровнями квантовой точки.

Тема 8. Спин-зависимое туннелирование в магнитных наноструктурах

Вопрос 6.

Туннельное магнетосопротивление. Модели Жулиера, Стирнса и Слончевского.

Вопрос 7.

Обобщенная модель Слончевского.

Вопрос 8.

Зависимость туннельного магнетосопротивления от температуры и приложенного напряжения.

Туннельное магнитное сопротивление или туннельное магнетосопротивление (сокр. TMC, англ. Tunnel MagnetoResistance, сокр. TMR) - квантовомеханический эффект, проявляется при протекании тока между двумя слоями ферромагнетиков разделенных тонким (около 1 нм) слоем диэлектрика. При этом общее сопротивление устройства, ток в котором протекает из-за туннельного эффекта, зависит от взаимной ориентации полей намагничивания двух магнитных слоев. Сопротивление выше при перпендикулярной намагниченности слоев. Эффект туннельного магнитного сопротивления похож на эффект гигантского магнитного сопротивления, но в нем, вместо слоя немагнитного металла используется слой изолирующего туннельного барьера. Эффект был открыт в 1975 Мишелем Жюльером, использовавшим железо в качестве ферромагнетика и германий в качестве диэлектрика. Он проявлялся при температуре 4,2 К, поэтому не привлек к себе внимания, из-за отсутствия практического применения. При комнатной температуре, действие эффекта было открыто в 1995 году впервые Терунобу Миязаки и независимо от него группой ученых во главе с Джагадишем Мудера, при возобновления интереса к исследованиям в этой области, после открытия эффекта гигантского магнитного сопротивления. В настоящее время на основании эффекта туннельного магнитного сопротивления создана магниторезистивная оперативная память (MRAM), и он также применяется в считывающих головках жестких дисков. В 2001 году группа Батлера и группа Матона независимо сделали теоретическое предсказание, что при использовании железа в качестве ферромагнетика и оксида магния в качестве диэлектрика, эффект туннельного магнитного сопротивления может возрасти на несколько тысяч процентов. В 2004 году, группа Перкина и группа Юаса смогли изготовить устройства на основе Fe/MgO/Fe и достичь величины туннельного магнетосопротивления в 200% при комнатной температуре. В 2007 году, устройства на основе туннельного магниторезистивного эффекта с оксидом магния полностью заменили устройства на основе эффекта гигантского магнитного сопротивления на рынке устройств магнитного хранения информации.

Методические указания по выполнению контрольных работ

Тема Теория транспорта в немагнитных металлах и полупроводниках.



Расчет магнетосопротивления (зависимости сопротивления от величины приложенного магнитного поля) в рамках классической теории Друде-Лоренца представляет значительный интерес с методической точки зрения, поскольку это позволяет практически ознакомиться с основами электронного транспорта в немагнитных проводящих системах. Дальнейшим продвижением в этом направлении является получение выражения для электропроводности на основе кинетического уравнения Больцмана, причем в качестве равновесной одночастичной функции распределения берется распределение Ферми-Дирака (что было впервые сделано Зоммерфельдом).

Тема Транспорт в низкоразмерных системах

Задача нахождения кондактанса квазиодномерной системы (нанопроволоки) требует учета выражения для плотности состояний в одномерном случае. Эту задачу можно обобщить путем введения туннельного барьера. Получаемое выражение для кондактанса (формула Ландауэра-Бюттикера) содержит 'квант' кондактанса. Постепенное увеличение поперечного размера нанопроволоки должно приводить к скачкообразному увеличению кондактанса ввиду увеличения числа возможных каналов проводимости - к квантованию кондактанса.

Эффект Ааронова-Бома связан с непосредственным проявлением потенциалов электромагнитного поля (векторного потенциала). Важно различать 'классический' эффект Ааронова-Бома, когда на пути движения электронов магнитного поля нет, а векторный потенциал отличен от нуля, и 'твердотельный' эффект Ааронова-Бома, когда мезоскопическое проводящее кольцо находится в магнитном поле и меняется магнитный поток через площадь кольца, что приводит к осцилляциям тока (кондактанса) через это кольцо, выражение для которых и нужно найти.

#### **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем, представлен в Приложении 3 к рабочей программе дисциплины (модуля).

#### **11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине (модулю) включает в себя следующие компоненты:

Помещения для самостоятельной работы обучающихся, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья) и оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

Учебные аудитории для контактной работы с преподавателем, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья).

Компьютер и принтер для распечатки раздаточных материалов.

Мультимедийная аудитория.

#### **12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

При необходимости в образовательном процессе применяются следующие методы и технологии, облегчающие восприятие информации обучающимися инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья:

- создание текстовой версии любого нетекстового контента для его возможного преобразования в альтернативные формы, удобные для различных пользователей;
- создание контента, который можно представить в различных видах без потери данных или структуры, предусмотреть возможность масштабирования текста и изображений без потери качества, предусмотреть доступность управления контентом с клавиатуры;
- создание возможностей для обучающихся воспринимать одну и ту же информацию из разных источников - например, так, чтобы лица с нарушениями слуха получали информацию визуально, с нарушениями зрения - аудиально;
- применение программных средств, обеспечивающих возможность освоения навыков и умений, формируемых дисциплиной, за счёт альтернативных способов, в том числе виртуальных лабораторий и симуляционных технологий;

- применение дистанционных образовательных технологий для передачи информации, организации различных форм интерактивной контактной работы обучающегося с преподавателем, в том числе вебинаров, которые могут быть использованы для проведения виртуальных лекций с возможностью взаимодействия всех участников дистанционного обучения, проведения семинаров, выступления с докладами и защиты выполненных работ, проведения тренингов, организации коллективной работы;
- применение дистанционных образовательных технологий для организации форм текущего и промежуточного контроля;
- увеличение продолжительности сдачи обучающимся инвалидом или лицом с ограниченными возможностями здоровья форм промежуточной аттестации по отношению к установленной продолжительности их сдачи:
- продолжительности сдачи зачёта или экзамена, проводимого в письменной форме, - не более чем на 90 минут;
- продолжительности подготовки обучающегося к ответу на зачёте или экзамене, проводимом в устной форме, - не более чем на 20 минут;
- продолжительности выступления обучающегося при защите курсовой работы - не более чем на 15 минут.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и учебным планом по направлению 03.04.02 "Физика" и магистерской программе "Теоретическая и математическая физика".

Приложение 2  
к рабочей программе дисциплины (модуля)  
Б1.В.ДВ.4 Теоретические основы спинтроники

**Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика  
Профиль подготовки: Теоретическая и математическая физика  
Квалификация выпускника: магистр  
Форма обучения: очное  
Язык обучения: русский  
Год начала обучения по образовательной программе: 2016

**Основная литература:**

1. Ансельм, А.И. Введение в теорию полупроводников. [Электронный ресурс] : Учебные пособия - Электрон. дан. - СПб. : Лань, 2016. - 624 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71742>
2. Прудников, В.В. Квантово-статистическая теория твердых тел. [Электронный ресурс] : Учебные пособия / В.В. Прудников, П.В. Прудников, М.В. Мамонова. - Электрон. дан. - СПб. : Лань, 2016. - 448 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72587>
3. Барыбин А.А., Томилин В.И., Шаповалов В.И. Физико-технологические основы макро-, микро- и наноэлектроники. Издательство: Физматлит, 2011 г. <http://e.lanbook.com/view/book/5258/>
4. Заяц А.Е. Введение в теорию классических калибровочных полей [Электронный ресурс]. КФУ, 2013. Режим доступа: <http://www.kpfu.ru/docs/F382346128/Methodichka1.pdf>
5. Заяц А.Е. Классические калибровочные поля и их симметрии [Электронный ресурс]. КФУ, 2013. Режим доступа: <http://www.kpfu.ru/docs/F382346128/Methodichka2.pdf>

**Дополнительная литература:**

1. Аплеснин, С.С. Основы спинтроники. [Электронный ресурс] : Учебные пособия - Электрон. дан. - СПб. : Лань, 2010. - 288 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/551>
2. Байков Ю.А. Физика конденсированного состояния. М. Бином. Лаборатория знаний. - 2011. - 293 с. [Электронный ресурс] <http://e.lanbook.com/view/book/4372>

Приложение 3  
к рабочей программе дисциплины (модуля)  
Б1.В.ДВ.4 Теоретические основы спинтроники

**Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика  
Профиль подготовки: Теоретическая и математическая физика  
Квалификация выпускника: магистр  
Форма обучения: очное  
Язык обучения: русский  
Год начала обучения по образовательной программе: 2016

Освоение дисциплины (модуля) предполагает использование следующего программного обеспечения и информационно-справочных систем:

Операционная система Microsoft Windows 7 Профессиональная или Windows XP (Volume License)  
Пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office 365 или Microsoft Office Professional plus 2010  
Браузер Mozilla Firefox  
Браузер Google Chrome  
Adobe Reader XI или Adobe Acrobat Reader DC  
Kaspersky Endpoint Security для Windows

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, учебно-методические комплексы, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.