

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета  
\_\_\_\_\_ Малышев А.И.

« 31 » \_\_\_\_\_ августа 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины**

«Спин-зависимые явления в твердых телах»

Уровень подготовки

Аспирантура

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность образовательной программы

01.04.10 «Физика полупроводников»

Квалификация

Исследователь, преподаватель-  
исследователь

Форма обучения  
очная

Нижний Новгород, 2021

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Спинзависимые явления в твердых телах» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

### Целями освоения дисциплины являются:

формирование у аспирантов представления о физике спин-зависимых явлений в твердых телах, полупроводниках и наноструктурах и применении этих явлений в исследованиях полупроводников и полупроводниковых наноструктур. Учебными задачами курса являются, во-первых, приобретение знаний теории спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, необходимых для ее практического применения, во-вторых, приобретение аспирантами практических навыков при изучении методов регистрации спин-зависимых явлений с использованием спинового резонанса и электрически детектируемого магнитного резонанса (ЭДМР), эффекта Фарадея, скивд-ячейки и спинового эффекта Холла для исследования свойств твердых тел.

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

Формируемые компетенции  (код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<b>ОПК-1</b>  Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	<i>З1 (ОПК-1) Знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности</i>  <i>У1 (ОПК-1) Умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;</i>  <i>В1 (ОПК-1) Владение опытом применения методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.</i>
<b>ПК-1</b>  Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской	<i>З1 (ПК-1) Знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах</i>

работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»	<p><i>У1 (ПК-1) Уметь выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и нанoeлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;</i></p> <p><i>В1 (ПК-1) Владеть опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах</i></p>
--	---

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 37 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, включая 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час - мероприятия промежуточной аттестации), 35 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего		
	Очное						
Тема 1 Введение. Угловой момент и спин элементарной частицы	6	2				4	
Тема 2 Взаимодействие спина с внешними полями	6	2				4	
Тема 3 Сверхтонкая структура уровней парамагнитной частицы	10	6				4	
Тема 4 Спин-спиновые взаимодействия	9	4				5	
Тема 5	12	6				6	

Спин-решеточные взаимодействия						
Тема 6 Спиновая релаксация носителей тока.	10	6				4
Тема 7 Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах	8	4				4
Тема 8 Методы исследования спин-зависимых явлений	10	6				4
ВСЕГО	71	36				35
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация - зачет						

#### 4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в виде лекций организованных, частично, в форме компьютерных презентаций и сопровождаются демонстрацией работ в различных научно-исследовательских лабораториях с использованием современного оборудования с привлечением высококвалифицированных специалистов. Самостоятельная работа включает в себя время на подготовку к практическим занятиям. Предусмотрено также коллективное участие обучающихся в качестве слушателей в школах проводимых в рамках двух традиционных конференций по наноэлектронике и нанофотонике.

Основные виды образовательных технологий: лекции и контроль самостоятельной работы.

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

*Виды самостоятельной работы.* Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов программы курса. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контролю самостоятельной работы (КСР) и осуществляется путём контрольных опросов по спискам вопросов.

##### Вопросы для контроля.

Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение динамики спинов.

Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха.

Квантовомеханическое описание динамики спинов. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.

Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.

Тонкая структура энергетического спектра. Природа анизотропии спиновых состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Сверхтонкая структура энергетического спектра. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.

Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая  $S=1/2$ ,  $I=3/2$ .

Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр.

Спин-решеточная релаксация локализованных спинов. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.

Спин-спиновые взаимодействия. Спиновая релаксация с участием спин-спиновых взаимодействий.

Спиновая релаксация носителей тока. Механизмы спиновой релаксации носителей тока Эллиотта-Яфета, Дьяконова-Переля, Бира-Аронова-Пикуса, механизм, связанный с неоднородностью  $g$ -фактора, механизм, обусловленный сверхтонким взаимодействием, релаксация, вызванная анизотропным обменным взаимодействием.

Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока. Спиновый эффект Холла. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока.

Рассеяния на магнитных примесях. Эффект Кондо на магнитных примесях и резонанс Абрикосова- Сула.

Спин-орбитальное взаимодействие. Спиновая релаксация .Спин-зависимое рассеяние. Спиновый эффект Холла: механизмы бокового прыжка и косоуго рассеяния.

Явление спиновой «накачки» (пампинга) и его применение для исследования инверсного спинового эффекта Холла

Транспорт в низкоразмерных системах: эффекты размерного квантования. Двумерный электронный газ. Полупроводниковые квантовые ямы. Квантовые проволоки.

Квантовые точки. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.

Эффект Кондо в проводимости через квантовую точку.

Методы исследования спин-зависимых явлений. Методы регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Спиновый эффект Холла и инверсный спиновый эффект Холла. Спиновый резонанс и электрически детектируемый магнитный резонанс (ЭДМР). Эффект фарадея. Сквид. Методы измерения скоростей спиновой релаксации.

Квантовые компьютеры на спиновых эффектах. Спиновые кубиты, модель Кейна.

## **6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине включающий:**

*6.1.Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования.*

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1

*Описание шкал оценивания*

«Зачтено» – владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, наличие хотя бы фрагментарных знаний по каждому из основных вопросов, способность критически анализировать и сравнивать получаемые научные результаты.

«Незачтено» – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

**Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:** - индивидуальное собеседование.

**Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:** -

*Простые задания применяются для оценки умений.*

*Комплексные практические задания применяются для оценки владений.*

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций.

*Индивидуальное собеседование с использованием вопросов для контроля применяются для оценивания результатов обучения в виде знаний*

*Простые задания применяются для оценки умений.*

*Пример: Дать классификацию спин-зависимых явлений в твердых телах.*

*Комплексные практические задания применяются для оценки владений.*

*Пример: Описать влияние электрических и упругих полей на спиновые состояния. Рассмотреть взаимодействие спина носителя тока с фоном при спин-флип процессах.*

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания приведены в фонде оценочных средств.

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

Основная литература.

1. Абрагам А., Блинн Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1972, Т.1, 2.
2. Ферромагнитный резонанс. Явление резонансного поглощения высокочастотного магнитного поля в ферромагнитных веществах. /Под ред. Чл. Корр. АН СССР С. В. Вонсовского./ М.: ФМ, 1961.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

Дополнительная литература.

1. Альтшуллер С. А., Козырев Б. М. ЭПР соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.: Мир, 1970
3. Страховский Г. М., Успенский А.В. Основы квантовой электроники. М.: ВШ, 1973, 312 с.

4. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М.: изд. МГУ, 1976, 367с.
5. Ашкрофт, Н. Физика твёрдого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т.1,2.

#### Рекомендуемая литература

1. Igor Zutic, Jaroslav Fabian, S. Das Sarma. Spintronics: Fundamentals and applications. Reviews of Modern Physics, V.76, 2004
2. Torrey, H.C., 1956, Bloch equations with diffusion terms, Phys. Rev. **104**, 563–565.
3. Elliott R.J., 1954, Theory of the effect of spin-orbit coupling on magnetic resonance in some semiconductors, Phys. Rev. **96**, 266–279.
4. Yafet, Y., 1963, in *Solid State Physics, Vol. 14*, edited by F. Seitz and D. Turnbull (Academic, New York), p. 2.
5. D'yakonov, M.I., and V.I. Perel', 1971e, Spin relaxation of conduction electrons in noncentrosymmetric semiconductors, Fiz. Tverd. Tela **13**, 3581–3585 [Sov. Phys. Solid State **13**, 3023–3026 (1971)].
6. Bir, G. L., A. G. Aronov, and G. E. Pikus, 1975, Spin relaxation of electrons due to scattering by holes, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69**, 1382–1397 [Sov. Phys. JETP **42**, 705–712 (1976)].
7. D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth (Eds.) Semiconductor spintronics and quantum computation (Springer, 2002).
8. Spin dependent transport in magnetic nanostructures. Ed. By S. Maekawa, T. Shinjo (Taylor and Francis, 2002).
9. Yongbing Xu, David D. Awschalom, Junsaku Nitta. Editors Handbook of Spintronics. Springer Science+Business Media Dordrecht 2016

#### **8. 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

Программные средства записи и обработки спектров спектрометра электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System: Bruker WinEPR Acquisition, и Bruker WinEPR Processing.

Спектрометр электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System с гелиевым криостатом, со стабилизацией температуры в диапазоне 3.8-300К.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Автор д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ А.А. Ежевский

Рецензент:

Заведующий кафедрой  
электроники твёрдого тела  
д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой  
физики полупроводников и оптоэлектроники  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

Программа рекомендована на заседании кафедры Физики полупроводников и  
оптоэлектроники от \_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от  
\_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_



**ОПК-1** Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
Знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	Отсутствия знаний	Фрагментарное знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	В целом успешное знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	Успешное и систематическое знание основных проблем в физике спин-зависимых явлений в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности
Умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;	Отсутствия умений	Частично освоенное умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах	В целом успешное, но не систематически осуществляемое умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-	Сформированное умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;

		для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;	твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;	исследовательской деятельности;	
Владение опытом применения методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но не систематическое применение методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	Успешное и систематическое применение методов применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.

**ПК-1** Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
Знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении	Отсутствие знаний	Фрагментарное знание основных методов и средств, применяемых при	В целом успешное знание основных методов и средств, применяемых при	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных методов и средств, применяемых при самостоятельном	Успешное и систематическое знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельном



		зависимых явлений в твердых телах	в физике спин- зависимых явлений в твердых телах		
Владеть опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах	Отсутстви е навыков	Фрагментарное владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах роводников»	В целом успешное, но не систематическое владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах роводников»	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владения опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах роводников»	Успешное и систематическое владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах роводников»