

**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**  
**«Новые электронные и спиновые эффекты в**  
**полупроводниковых структурах и графене»**

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. Высокмолекулярные 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 наноэлектроники, 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. Медиакоммуникации и журналистика

Нижегород  
2023 год

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

Дисциплина «Новые электронные и спиновые эффекты в полупроводниковых структурах и графене» является факультативной дисциплиной и изучается на 3 году обучения, в 6 семестре.

#### Целями освоения дисциплины являются:

- овладение основными положениями современной квантовой теории полупроводниковых структур с сильным спин-орбитальным взаимодействием, в частности, структур, принадлежащих к классу топологических изоляторов;
- освоение методов расчёта квантовых состояний, спиновой поляризации, а также релаксационных, транспортных и оптических характеристик в изучаемых структурах;
- приобретение практических навыков расчёта основных параметров типичных структур для использования их в экспериментальных и промышленных приложениях, в том числе в качестве устройств хранения и обработки информации в схемах квантовых вычислений;
- ознакомление с физическими свойствами двумерной формы углерода – графена, как кандидата в материалы для приборов микро- и нанoeлектроники;
- освоение методов расчёта электронных и транспортных свойств состояний графена и других двумерных структур, квазичастицы в которых описываются релятивистским уравнением Дирака.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет всего - 36 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 18 часа, 18 часа – занятия семинарского типа).

**Таблица 2**

**Структура 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				
1. Элементы спинтроники и физики топологическ	36	9	9	–	18	18

их изоляторов.						
2. Электронные и транспортные свойства графеновых структур и материалов с дираковским спектром.	35	9	9	–	18	17
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – зачет						

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

№П/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятий	Форма текущего контроля
1.	Элементы спинтроники и физики топологических изоляторов.	<p>Спин-орбитальное взаимодействие как источник новых эффектов в полупроводниковых структурах.</p> <p>Основные механизмы энергетической и спиновой релаксации.</p> <p>Принципы работы некоторых устройств спинтроники.</p> <p>Элементы теории топологических изоляторов.</p> <p>Обзор основных эффектов и приложений топологических изоляторов.</p>	Лекции, практические занятия.	Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям.

2.	Электронные транспортные свойства графеновых структур и материалов дираковским спектром.	и 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.	Лекции, практические занятия.	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**

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<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 зачета обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины

1. Микроскопические механизмы формирования спин-орбитального взаимодействия.
2. Основные параметры некоторых видов спин-орбитального взаимодействия в полупроводниковых наноструктурах.
3. Основные механизмы энергетической релаксации при взаимодействии системы с термостатом.
4. Главные механизмы спиновой релаксации в полупроводниковых наноструктурах.
5. Принципы работы спинового диода и спинового транзистора.
6. Основные свойства топологических изоляторов.
7. Методы расчёта краевых состояний в топологических изоляторах.
8. Наблюдаемые в экспериментах эффекты и приложения топологических изоляторов.
9. Электронная структура графена. Уравнение Дирака для электронов в графене.
10. Туннелирование через прямоугольный потенциальный барьер в графене. Парадокс Клейна.
11. Электронные состояния в графеновых нанолентах.
12. Квантование Ландау для безмассовых Дираковских фермионов.
13. Дираковская частица в периодическом потенциале. Метод матрицы переноса.

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

а) основная литература:

1. 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))
2. 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))
3. 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>)
4. 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>)
5. 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>)
6. 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>)
7. 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>)
8. 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. Демиховский, В.Я. *Низкоразмерные структуры спинтроники. Курс лекций*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007. – 126 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=449220>
2. Fabian, J., Matos-Abiague, A., Ertler, C., Stano, P., Zutic, I. *Semiconductor spintronics* // Acta Physica Slovacia, 2007, V. 57, p. 565. (Свободный доступ в сети Интернет: <http://arxiv.org/pdf/0711.1461>)
3. 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>)
4. 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>)
5. 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>)
6. 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>)

7. 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>)
8. 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.

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения для проведения занятий: лекционного 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.

Авторы

доцент кафедры теоретической физики  
физического факультета,  
к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_ / Хомицкий Д.В. /

доцент кафедры теоретической физики  
физического факультета,  
к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_ / Максимова Г.М. /

Рецензент (ы)

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н., доц. Бурдов В.А.

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