

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" "_____ 2022 г. №

Рабочая программа дисциплины
Двумерный электронный газ в квантующем магнитном поле

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Научная специальность
03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2022 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Двумерный электронный газ в квантующем магнитном поле» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору и изучается на 2 году обучения, в 3 семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- овладение основными положениями современной квантовой теории полупроводниковых сверхрешеток с сильным спин-орбитальным взаимодействием, помещенных в квантующее магнитное поле;
- освоение методов расчёта квантовых состояний, спиновой поляризации, 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 типа спинового клапана и спинового фильтра;
- освоение методов расчёта электронных состояний, магнитотранспортных и магнитооптических свойств двумерных полупроводниковых решеточных структур.

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. Методы расчета электронных состояний в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках в перпендикулярном магнитном поле. | 35 | 6 | 6 | – | 12 | 23 |
| 2. Магнитотранспорт в двумерных сверхрешетках n-типа в магнитных полях. Квантовый целочисленный эффект Холла. | 35 | 6 | 6 | – | 12 | 23 |

| | | | | | | |
|---|----|---|---|---|----|----|
| 3. Магнитооптические эффекты в двумерном электронном газе сверхрешетки. Влияние спин-орбитального взаимодействия на течение магнитооптических эффектов Керра и Фарадея. | 36 | 6 | 6 | – | 12 | 24 |
| 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. | Методы расчета электронных состояний в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках в перпендикулярном магнитном поле. | Квантование Ландау поперечного движения электрона в магнитном поле. Методы расчета зонной структуры полупроводников. Искусственные кристаллы – сверхрешетки и методы их формирования. Спектры носителей в сверхрешетках в магнитном поле, классификация состояний. Магнитные блоховские подзоны. Спин-орбитальное взаимодействие как источник новых эффектов в полупроводниковых структурах. | Лекции, семинары. | Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям. |
| 2. | Магнитотранспорт в двумерных сверхрешетках n-типа в магнитных полях. Квантовый | Продольный транспорт в магнитном поле. Вольт-амперные характеристики. Квантование кондактанса в | Лекции, семинары. | Презентации обучающимися докладов по индивидуальным тематическим заданиям. |

| | | | | |
|----|--|--|-------------------|--|
| | целочисленный эффект Холла. | условиях КЦЭХ, влияние топологических характеристик магнитных подзон на законы квантования кондактанса. Роль спин-орбитального взаимодействия. | | |
| 3. | Магнитооптические эффекты в двумерном электронном газе сверхрешетки. Влияние спин-орбитального взаимодействия на течение магнитооптических эффектов Керра и Фарадея. | Спектры поглощения электромагнитного излучения газом носителей в магнитном поле. Правила отбора для переходов, теоретико-групповой анализ квантовых состояний. Переходы в спектре магнитных подзон для волн различной поляризации. Магнитный круговой дихроизм. Течение полярного эффекта Керра и Фарадея. Связь со спиновой поляризацией квантовых состояний. | Лекции, семинары. | 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. Метод почти свободных электронов.
2. Метод сильно связанных электронов.
3. «Лестницы» уровней Ландау в полупроводниках.
4. Классификация состояний электрона в кристалле в магнитном поле.
5. Задача Харпера-Ховштадтера.
6. Состояния электронов в сверхрешетках в сильных магнитных полях. Методы расчета.
7. Типы спин-орбитального взаимодействия в твердых телах.
8. Правила отбора при поглощении ЭМИ газом носителей в магнитном поле.
9. Квантовый целочисленный эффект Холла в двумерном электронном газе сверхрешетки.
10. Магнитооптические эффекты Керра и Фарадея.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Киттель Ч. – Квантовая теория твердых тел. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=78911> 3 экз
2. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. – Электронная теория металлов. – М.: Наука, 1971. – 416 с.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77342> 10 экз
3. 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. http://www.unn.ru/books/met_files/SpinDensity.pdf
4. Перов А.А., Пенягин И.В. – Магнитные блоховские электронные состояния и спиновая поляризация в двумерных сверхрешетках без центра инверсии со спин-орбитальным взаимодействием Рашба в электронном газе // ЖЭТФ, Т. 145, вып. 3, С. 535–539 (2014).
http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_145_535.pdf
5. Демиковский, В.Я. Магнитные блоховские состояния и холловская проводимость двумерного электронного газа в периодическом потенциале без центра инверсии / В.Я. Демиковский, А.А. Перов // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т. 76, вып. 10 – С. 723–728.
http://www.jetpletters.ac.ru/ps/606/article_9500.shtml
6. Demikhovskii, V.Ya. Hall conductance of a two-dimensional electron gas with spin-orbit coupling at the presence of lateral periodic potential / V.Ya. Demikhovskii, A.A. Perov // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – P. 205307.
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.75.205307>
7. Перов А.А., Пенягин И.В. Квантовые состояния носителей заряда и продольная проводимость двоякопериодических полупроводниковых решеточных структур n-типа в электрическом поле // ЖЭТФ, Т. 148, вып. 1(7), С. 127–132 (2015).
http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_148_127.pdf
8. Перов, А.А. «Магнитотранспорт и оптика полупроводниковых решеточных структур спинтроники» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 44 с.
<http://phys.unn.ru/content.asp?contentid=3471>
9. Бычков, Ю.А. Свойства двумерного электронного газа со снятым вырождением спектра / Ю.А. Бычков, Э.И. Рашба // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39, № 2. – С. 66–69.
http://www.jetpletters.ac.ru/ps/77/article_1379.pdf
10. Перов, А.А. «Магнитопоглощение электромагнитного излучения двумерным электронным газом со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы в гетеропереходе с

поверхностной сверхрешеткой» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 2. – С. 214–219.

<http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/6763>

11. Перов, А.А. Электродинамический отклик носителей заряда в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках n-типа в постоянном однородном магнитном поле / А.А. Перов, А.С. Рульков, Е.А. Морозова, Е.В. Золина // ЖЭТФ. – 2017. – Т. 151, вып. 5. – С. 974–981.

http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_151_0974.pdf

б) дополнительная литература:

1. Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. – Основы спинтроники: учебное пособие. – Нижний Новгород, 2009, 173 с.

http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf

2. Thouless, D.J. Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential / D.J. Thouless, M. Kohmoto, M.P. Nightingale, M. den Nijs // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 49, № 6. – P. 405–408.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.49.405>

3. Langbein, D. The tight-binding and nearly-free-electron approach to lattice electrons in external magnetic fields // Phys. Rev. – 1969. – Vol. 180, № 3. – P. 633–648.

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.180.633>

4. Hofstadter, D.R. Energy levels and wave functions of Bloch electrons in rational and irrational magnetic field // Phys. Rev. B. – 1976. – Vol. 14. – P. 2239–2249.

<link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevB.14.2239>

5. Claro, F.H. Magnetic subband structure of electrons in hexagonal lattices / F.H. Claro, G.H. Wannier // Phys. Rev. B. – 1979. – Vol. 19, № 12. – P. 6068–6074.

<https://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.19.6068>

6. Dresselhaus, G. Spin-orbit coupling effects in zinc blende structures // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 100. – P. 580–586.

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.100.580>

7. Žutić, I. Spintronics: fundamentals and applications / I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma // Rev. Mod. Phys. – 2004. – Vol. 76. – P. 323–410.

<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.76.323>

8. Ganichev, S.D. Experimental separation of Rashba and Dresselhaus spin splitting in semiconductor quantum well / S.D. Ganichev, V.V. Bel'kov, L.E. Golub, E.L. Ivchenko, Petra Schneider, S. Giglberger, J. Eroms, J. De Boeck, G. Borghs, W. Wegscheider, D. Weiss, and W. Prettl // Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 92. – P. 256601.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.92.256601>

9. Perov, A.A. Terahertz radiation-induced conductivity, Kerr and Faraday angles, and spin textures in a two-dimensional electron gas with spin-orbit coupling subjected to a high magnetic field and periodic potential / A.A. Perov, L.V. Solnyshkova, and D.V. Khomitsky // Phys. Rev. B. – 2010. – Vol. 82. – P. 165328.

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.82.165328>

10. Уханов Ю.И. – Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77514>

11. Перов, А.А. «Магнитные блоховские состояния и транспорт носителей в двумерных полупроводниковых решеточных структурах со спин-орбитальным взаимодействием» / А.А. Перов, Л.В. Солнышкова // Письма в ЖЭТФ. – 2008. - Т. 88. – С. 717–723.

http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1853/article_28291.shtml

12. Перов, А.А. Об эффектах Керра и Фарадея при воздействии терагерцового излучения на сверхрешетку со спин-орбитальным взаимодействием / А.А. Перов, Д.В. Хомицкий, Л.В. Солнышкова // Вестник ННГУ. – 2010. – № 5, вып. 2. – С. 36–38.

[http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/999999999_West_2010_5\(2\)/3.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/999999999_West_2010_5(2)/3.pdf)

13. Звездин А.К., Котов В.А. – Магнитооптика тонких пленок. – М.: Наука, 1988. – 190 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=78385>

14. 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>

15. J. Sinova, S.O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, T. Jungwirth. – Spin Hall effects. – Rev. Mod. Phys. – Vol. 87. – P. 1213 (2015).

<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.87.1213>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. <http://www.lib.unn.ru/> – сайт Фундаментальной библиотеки ННГУ/
2. <http://journals.aps.org/rmp/> – сайт журнала Reviews 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://jetpletters.ac.ru/> – сайт журнала «Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики».
6. <http://jetp.ac.ru/> – сайт «Журнала экспериментальной и теоретической физики».
7. www.arxiv.org – сайт электронного архива Корнельского Университета со свободным доступом к публикациям.

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

_____ / Перов А.А. /

профессор кафедры теоретической физики
физического факультета,
д. ф.-м. н., профессор

_____ / Сатанин А.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