

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**

Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных  
магнитных полях

(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)

Нижегород

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

Дисциплина «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является элективной дисциплиной, преподается на втором году обучения, в третьем семестре.

Целями освоения дисциплины «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях» являются:

- освоение студентами методов качественного и количественного анализа и описания электронных, оптических и транспортных явлений в современной физике полупроводников в сильных магнитных полях;
- обучение студентов навыкам и приемам аналитического и численного решения задач магнитооптики и магнитотранспорта носителей заряда в полупроводниковых структурах;
- выработка студентами компетенций, навыков постановки задач, их решения и анализа результатов в области современной физики полупроводников в сильных магнитных полях.

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

Объем дисциплины «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях» составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (1 час – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося (39 часов самостоятельная работа в течение семестра).

Содержание дисциплины «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях»

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. Электронные состояния в решеточных структурах спинтроники.</b> Методы расчета электронных состояний в двоякопериодических полупроводниковых сверхрешетках в перпендикулярном магнитном поле.	22	4	4	—	8	14
<b>2. Магнитотранспорт в решеточных структурах спинтроники.</b> Магнитотранспорт в двумерных сверхрешетках n-типа в магнитных полях. Квантовый целочисленный эффект Холла.	33	6	6	—	12	21
<b>3. Магнитооптика в решеточных структурах спинтроники.</b> Магнитооптические эффекты в двумерном электронном газе сверхрешетки. Влияние спин-орбитального взаимодействия на течение магнитооптических эффектов Керра и Фарадея.	33	6	6	—	12	21
<b>В т.ч. текущий контроль</b>	2	2				—
Промежуточная аттестация – зачет						

### 3. Образовательные технологии

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

8) 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)**

<b>Формируемые компетенции</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине</b>
<b>ПК-4</b> Способен принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в инженерно-конструкторской, инженерно-технологической, инновационной и проектной деятельности	(ПК-4) <b>Знать</b> основные физические принципы описания магнитотранспортных и магнитооптических явлений в полупроводниковых сверхрешетках. (ПК-4) <b>Уметь</b> ставить задачи исследований и решать типовые задачи магнитооптики и магнитотранспорта полупроводников. (ПК-4) <b>Владеть</b> навыками решения основных типов задач физики полупроводниковых сверхрешеток в сильных магнитных полях.

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

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

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях» является **зачет**.

По итогам зачета выставляется оценка «Зачтено» или «Не зачтено». Оценка «Не зачтено» означает отсутствие аттестации, оценка «Зачтено» выставляется 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.

### 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 «Электронные явления в полупроводниковых структурах в сильных магнитных полях»:

1. Метод сильной связи.
2. Приближение почти свободных электронов.
3. Квантование Ландау в магнитном поле.
4. Задача Харпера-Ховштадтера.
5. Спин-орбитальное взаимодействие в электронном газе полупроводников.
6. Магнитные подзоны Ландау.
7. Граничные условия Блоха-Пайерлса.
8. Квантовый эффект Холла.
9. Квантование кондактанса в системах со спин-орбитальным взаимодействием.
10. Продольный магнитотранспорт в полупроводниковых сверхрешетках.
11. Фаза Берри. Кривизна Берри.
12. Магнитооптический эффект Фарадея.
13. Магнитооптический эффект Керра.

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

1. Двоякопериодическая сверхрешетка в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием Рашба.
2. Спектр двоякопериодической сверхрешетки в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием Дрессельхауза, помещенной в поперечное сильное магнитное поле.
3. Задача Харпера-Ховштадтера на решетке графена.
4. Проводимость двоякопериодической сверхрешетки в двумерном электронном газе, помещенной в поперечное сильное магнитное поле.
5. Магнитооптический эффект Керра в двоякопериодической сверхрешетке в двумерном электронном газе, помещенной в поперечное сильное магнитное поле.

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. Киттель Ч. – Квантовая теория твердых тел. – М.: Наука, 1967. – 491 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=78911>.

2. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. – Электронная теория металлов. – М.: Наука, 1971. – 416 с.

Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=77342>.

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.

Свободный доступ: [http://www.unn.ru/books/met\\_files/SpinDensity.pdf](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](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_145_535.pdf).

5. Демиховский, В.Я. Магнитные блоховские состояния и холловская проводимость двумерного электронного газа в периодическом потенциале без центра инверсии / В.Я. Демиховский, А.А. Перов // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т. 76, вып. 10 – С. 723–728.

[http://www.jetpletters.ac.ru/ps/606/article\\_9500.shtml](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 про-дольная 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](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_148_127.pdf).

8. 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](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/77/article_1379.pdf).

9. 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>.

10. 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](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](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](http://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.

Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 3 экз.

<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](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/99999999\\_West\\_2010\\_5\(2\)/3.pdf](http://www.unn.ru/pages/e-library/vestnik/99999999_West_2010_5(2)/3.pdf).

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

Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 2 экз.

<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. Jairo Sinova, Sergio 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:

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.

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., доцент \_\_\_\_\_ / Перов 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. /