

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра квантовой электроники**



**Рабочая программа дисциплины
Полупроводниковая элементная база квантовой информатики**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часа										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И.Б. Логащенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	6
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	6
5. Перечень учебной литературы.....	8
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	10

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель курса – освоение базовых принципов реализации квантовых вычислений с использованием полупроводниковой элементной базы.

При освоении курса у обучающегося формируются следующие профессиональные компетенции:

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
---	------------	-----------------------------------

ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области, основные понятия физики полупроводников, особенности полупроводниковых гетероструктур и низкоразмерных квантовых структур, подходы к использованию полупроводниковых структур для квантовых вычислений, механизмы потери когерентности в полупроводниковых квантовых системах. Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, основные понятия физики полупроводников, особенности полупроводниковых гетероструктур и низкоразмерных квантовых структур, подходы к использованию полупроводниковых структур для квантовых вычислений, механизмы потери когерентности в полупроводниковых квантовых системах. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами создания кубитов и реализации квантовых операций на с использованием полупроводниковой элементной базы.
--	---	--

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики» реализуется в осеннем семестре 2-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой электроники. Для успешного освоения курса необходимо знание линейной алгебры и математического анализа, умение применять эти знания при решении задач, так как они составляют основу математического аппарата квантовой физики, а также знание основ квантовой механики и физики твердого тела, так как исследуемые вопросы опираются на квантовые свойства конденсированного состояния вещества.

Курс предшествует выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			3
1		Лекции, ч	16
2		Практические занятия, ч	16
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	36
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	36
10		Всего, ч	72

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

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Общие принципы твердотельной квантовой информатики (2 часа)

- 1.1 Базовые понятия квантовой информатики. Спин, двухуровневые системы. Когерентность. Квантовые логические операции.
- 1.2 Основные методы осуществления квантовых операций (оптика, импульсная СВЧ техника).
- 1.3 Критерии Ди Винченцо: взгляд со стороны твердотельной электроники.

2. Основные понятия физики полупроводников (2 часа)

- 2.1 Энергетические зоны в полупроводниках, закон дисперсии.

- 2.2 Электроны и дырки, примесные состояния, барьеры, изгиб зон.
- 2.3 Полупроводниковые гетероструктуры.
- 2.4 Низкоразмерные квантовые структуры в полупроводниках (квантовые ямы, квантовые точки).
- 2.5 Спин-орбитальное взаимодействие, g-фактор, сверхтонкое взаимодействие, обменное взаимодействие.

3. Полупроводниковые структуры для реализации квантовых вычислений (2 часа)

- 3.1 Полупроводниковые квантовые точки, созданные с помощью затворных технологий на основе двумерного газа (схема Дэниэла Лосса и Дэвида Ди Винченцо).
- 3.2 Эпитаксиальные квантовые точки в гетеросистемах A_3B_5 , Ge/Si (экситонные, орбитальные и спиновые состояния).
- 3.3 Двойные квантовые точки.
- 3.4 Примесные состояния в полупроводниковой матрице (модель Кейна).
- 3.5 NV-центры в алмазе.

4. Механизмы потери квантовой когерентности в полупроводниковых системах (4 часа)

- 4.1 Тепловые флуктуации.
- 4.2 Роль спин-орбитального взаимодействия.
- 4.3 Сверхтонкое и обменное взаимодействие с окружением.
- 4.4 Флуктуации электрического поля.

5. Проблемы создания полупроводниковых структур для реализации квантовых вычислений (2 часа)

- 5.1 Масштабирование.
- 5.2 Адресация кубитов

6. Чтение спиновой информации (2 часа)

- 6.1 Одноэлектронный транзистор.
- 6.2 Оптические методы.

7. Заключение (2 часа)

- 7.1 Организация взаимодействия между удаленными кубитами,
- 7.2 Недостатки и преимущества существующих схем квантовых вычислений.
- 7.3 Современное состояние исследований.

Программа практических занятий (16 часов)

1. Занятие 1 (2 часа).

Оценить концентрацию доноров в эпитаксиальном слое кремния толщиной 200 нм, закрывающем слой квантовых точек, необходимую для создания заселенности в слое квантовых точек, равную 1 электрону на квантовую точку. Двумерная плотность квантовых точек 10^{11}см^{-2} .

2. Занятие 2 (2 часа).

Определить размер области пространственного заряда в слое кремния, легированного донорами с концентрацией 10^{16}см^{-2} .

3. Занятие 3 (2 часа).

Оценить сколько электронов сможет локализоваться в стеке двойных квантовых точек с характерными латеральными размерами 100 нм, энергией основного состояния 80 мэВ. Толщина стека 10 нм, стек находится на расстоянии 10 нм от слоя кремния, легированного сурьмой, энергия электрона, локализованного на атоме сурьмы 43 мэВ.

4. Занятие 4 (2 часа).

Оценить, насколько изменится энергия основного состояния электрона, локализованного на вершине Ge/Si квантовой точки и на её периферии, при подсветке образца с квантовыми точками. Характерные латеральные размеры квантовой точки 30 нм, высота 3 нм. Интенсивность света считать достаточной для генерации 1 дырки на квантовую точку.

5. Занятие 5 (4 часа).

Оценить влияние изменения энергии связи электрона на 10 мэВ на величину g-фактора электрона, локализованного в кремнии. Взять для оценки величину спин-орбитального расщепления в кремнии равной 42 мэВ, расстояние до ближайшей валентной зоны в Δ точке ~ 4 эВ.

6. Занятие 6 (2 часа).

Рассчитать степень спиновой поляризации электронов, локализованных в Si квантовых точках, при температуре жидкого гелия, жидкого азота и комнатной температуре, в магнитном поле $H=0.3$ Тл.

7. Занятие 7 (4 часа).

Рассчитать величину электрического поля, создаваемого затвором в системе Si/SiO₂ и формирующего потенциальную яму с квантованием по оси Z, необходимую для обеспечения характерного размера волновой функции локализованного электрона $l_z=1$ нм.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	2
Решение домашних заданий	16
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. М. Нильсен, И. Чанг Квантовые вычисления и квантовая информация. — Москва, «Мир», 2006. — 824 с., ISBN 5-03-003524-9 (2 экз.)
2. К.А. Валиев, А. А. Кокин. Квантовые компьютеры: надежды и реальность (2001), ISBN 5-93972-024-2 (1 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. B. E. Kane. A silicon-based nuclear spin quantum computer. *Nature* **489**, 393 (1998)
2. D. Loss and D. P. DiVincenzo. Quantum computation with quantum dots. *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
2. T. Heindel, A. Thoma, I. Schwartz, E. R. Schmidgall, L. Gantz, D. Cogan, M. Strauß, P. Schnauber, M. Gschrey, J.-H. Schulze, A. Strittmatter, S. Rodt, D. Gershoni and S. Reitzenstein. Accessing the dark exciton spin in deterministic quantum-dot microlenses. *APL Photonics* **2**, 121303 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5004147>
3. Tosi, G., Mohiyaddin, F.A., Schmitt, V. *et al.* Silicon quantum processor with robust long-distance qubit couplings. *Nat. Commun.* **8**, 450 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00378-x>
4. D. M. Zajac, A. J. Sigillito, M. Russ, F. Borjans, J. M. Taylor, G. Burkard, J. R. Petta, Resonantly driven CNOT gate for electron spins. *Science* **359**, 439 (2018). DOI: 10.1126/science.aao5965
5. Samkharadze, G. Zheng, N. Kalhor, D. Brousse, A. Sammak, U. C. Mendes,
i. Blais, G. Scappucci, L. M. K. Vandersypen. Strong spin-photon coupling in silicon. *Science* **359**, 1123–1127 (2018).

6. Takashi Nakajima, Akito Noiri, Jun Yoneda, Matthieu R. Delbecq, Peter Stano, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Shinichi Amaha, Giles Allison, Kento Kawasaki, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Daniel Loss and Seigo Tarucha. Quantum non-demolition measurement of an electron spin qubit. *Nature Nanotechnology* 14, 555 (2019).
7. Hyochul Kim, Ranojoy Bose, Thomas C. Shen, Glenn S. Solomon and Edo Waks. A quantum logic gate between a solid-state quantum bit and a photon. *Nature Photonics* 7, 373 (2013).
8. T. F. Watson, B. Weber, M. G. House, H. Büch, and M. Y. Simmons. High-Fidelity Rapid Initialization and Read-Out of an Electron Spin via the Single Donor D⁻ Charge State. *Phys. Rev. Lett.* 115, 166806 (2015)
9. Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A. *et al.* Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature* **526**, 682–686 (2015)
10. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. *et al.* Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* **574**, 505–510 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.
11. Bernien, H., Hensen, B., Pfaff, W. *et al.* Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres. *Nature* **497**, 86–90 (2013).
<https://doi.org/10.1038/nature12016>
12. Seiki Akama. *Elements of Quantum Computing History, Theories and Engineering Applications*. Springer International Publishing Switzerland (2015)
13. M. A. Nielsen, I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press (2000) .

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем выборочного опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, проверки выполнения домашних заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области статистической оптики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в устной форме.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
-----------	----------------------------------	--------------------

ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области, основные понятия физики полупроводников, особенности полупроводниковых гетероструктур и низкоразмерных квантовых структур, подходы к использованию полупроводниковых структур для квантовых вычислений, механизмы потери когерентности в полупроводниковых квантовых системах. Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, основные понятия физики полупроводников, особенности полупроводниковых гетероструктур и низкоразмерных квантовых структур, подходы к использованию полупроводниковых структур для квантовых вычислений, механизмы потери когерентности в полупроводниковых квантовых системах. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами создания кубитов и реализации квантовых операций на с использованием полупроводниковой элементной базы.	Опрос в начале каждой лекции, выполнение домашних заданий, экзамен.
---	--	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 90% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан развернутый ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «хорошо», – точность и корректность применения терминов и понятий; - умение делать выводы и обобщения, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. В ответах на вопросы обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 80% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. В ответах на вопросы обучающийся мог допустить незначительные ошибки.	<i>Хорошо</i>
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 70% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на один вопрос билета и оценка на письменной части экзамена (или хотя бы одна из двух оценок за потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Удовлетворительно</i>
<u>Сдача заданий:</u> сдано менее 60% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - не даны правильные ответы на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена «неудовлетворительно», – не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Примеры задач для самостоятельного решения

1. Оценить сколько электронов сможет локализоваться в стеке двойных квантовых точек с характерными латеральными размерами 100 нм, энергией основного состояния 80 мэВ. Толщина стека 10 нм, стек находится на расстоянии 10 нм от слоя кремния, легированного сурьмой, энергия электрона, локализованного на атоме сурьмы 43 мэВ.
2. Оценить влияние изменения энергии связи электрона на 10 мэВ на величину g-фактора электрона, локализованного в кремнии. Взять для оценки величину спин-орбитального расщепления в кремнии равной 42 мэВ, расстояние до ближайшей валентной зоны в Δ точке ~ 4 эВ.
3. Рассчитать величину электрического поля, создаваемого затвором в системе Si /SiO₂ и формирующего потенциальную яму с квантованием по оси Z, необходимую для обеспечения характерного размера волновой функции локализованного электрона $l_z=1$ нм.

Пример билета к экзамену

1. Провести сравнение схемы квантовых вычислений с использованием локализованных состояний в квантовых точках и схемы, основанной на использовании примесных состояний. Выделить преимущества и недостатки
2. Основные принципы импульсной СВЧ техники для управления состояниями кубитов.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.