**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Полупроводниковая элементная база квантовой информатики**

Учебно-методический комплекс

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

**Новосибирск 2018**

Учебно-методический комплекс «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики» предназначен для студентов магистратуры физического факультета НГУ, разработан в 2018 согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).В состав комплекса включены рабочая программа дисциплины «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики», банк обучающих материалов, банк контролирующих материалов, фонд оценочных средств.

УМК одобрен на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к.ф.-м.н. А.Ф.Зиновьева

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Полупроводниковая элементная база квантовой информатики**

Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Семестр** | **Общий**  **объем** | **Виды учебных занятий (в часах)** | | | | | | **Промежуточная аттестация**  **(в период сессии) (в часах)** | | | | |
| Контактная работа обучающихся  с преподавателем | | | | | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа  обучающихся с  преподавателем | | | |
| Лекции | | Семинары | Практические занятия | Лабораторные занятия | Консультации | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 3 | 72 | 16 | | 16 |  |  | 18 | 18 | 2 |  |  | 2 |
| Всего 72 часа / 2 зачетных единицы  из них:  - контактная работа 36 часов  - в интерактивных формах 16 часов | | | | | | | | | | | | |
| Компетенции | | | ПК-1, ПК-2 | | | | | | | | | |

**Новосибирск 2018**

Рабочая программа дисциплины «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики», предназначенная для магистрантов физического факультета НГУ, разработана в 2018 году согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).

Место дисциплины в структуре учебного плана

Б.1 «Вариативная часть».

Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ

**04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к. ф.-м. н. А.Ф. Зиновьева

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**Содержание**

Аннотация ..6

1. Цели освоения дисциплины 6

2. Место дисциплины в структуре ООП 6

3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины 7

4. Структура и содержание дисциплины 7

5. Образовательные технологии ….9

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов...10

7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения

дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые

контрольные задания………………………………………………………….10

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература к теоретическому курсу 10

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины 11

**Аннотация**

Программа курса **«Полупроводниковая элементная база квантовой информатики»** составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки магистра по направлению подготовки 03.04.02 Физика (уровень магистратуры), а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой квантовой электроники. Дисциплина изучается студентами первого курса магистратуры физического факультета.

В результате освоения курса у обучающегося должны быть сформированы профессиональные компетенции ПК-1 и ПК-2.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, решение задач, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос, проверка решения задач.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

* занятия лекционного типа – 16 часа;
* занятия практического типа – 16 часов;
* самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
* промежуточная аттестация (подготовка к экзамену, консультация, экзамен) – 22 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практического типа, консультация, экзамен) составляет 36 часов. Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 16 часов.

## Цели освоения дисциплины

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

## Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Курс «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики» является дисциплиной специализации в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть семестрового цикла и необходим для овладения основными представлениями схем построения современных сверхчувствительных квантовых сенсоров.

Для успешного освоения курса необходимо знание линейной алгебры и математического анализа и умение применять эти знания при решении задач, так как они составляют основу математического аппарата квантовой физики, знание основ квантовой механики и физики твердого теща, так как исследуемые вопросы опираются на квантовые свойства конденсированного состояния вещества.

1. **Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины**

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

**научно-исследовательская деятельность:**

ПК-1: способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта, в том числе:

ПК 1.1: 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.

ПК 1.2: уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий.

ПК 1.3: 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.

**научно-инновационная деятельность:**

ПК-2: способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

ПК-2.1 Знать: 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.

ПК-2.2 Уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области полупроводниковой элементной базы квантовой информатики;

ПК-2.3 Владеть базовыми принципами создания кубитов и реализации квантовых операций на с использованием полупроводниковой элементной базы.

1. **Структура и содержание дисциплины «Полупроводниковая элементная база квантовой информатики»**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Раздел**  **дисциплины** | **Неделя семестра** | **Всего** | **Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)** | | | **Промежуточная аттестация (в период сессии)**  **(в часах)** |
| Аудиторные часы | | Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии) |
| Лекции  (кол-во часов) | Семинары  (кол-во  часов) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Общие принципы твердотельной квантовой информатики  *Форма контроля: выборочный опрос.* | 1 | 4 | 2 |  | 2 |  |
| 2 | Основные понятия физики полупроводников  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 2-3 | 6 | 2 | 2 | 2 |  |
| 3 | Полупроводниковые структуры для реализации квантовых вычислений  *Форма контроля: выборочный опрос и проверка решения задач* | 4 –5 | 6 | 2 | 2 | 2 |  |
| 4 | Механизмы потери квантовой когерентности в полупроводниковых системах  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 6–9 | 10 | 4 | 4 | 2 |  |
| 5 | Проблемы создания полупроводниковых структур для реализации квантовых вычислений  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 10-12 | 10 | 2 | 4 | 4 |  |
| 6 | Чтение спиновой информации  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 13 | 4 | 2 |  | 2 |  |
| 7 | Заключение  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 14-16 | 10 | 2 | 4 | 4 |  |
| 8 | Самостоятельная подготовка к экзамену |  | 18 |  |  |  | 18 |
| 9 | Групповая консультация |  | 2 |  |  |  | 2 |
| 10 | Экзамен |  | 2 |  |  |  | 2 |
| **Всего** | | | **72** | **16** | **16** | **18** | **22** |

**Программа курса лекций**

1. Общие принципы твердотельной квантовой информатики
   1. Базовые понятия квантовой информатики. Спин, двухуровневые системы. Когерентность. Квантовые логические операции.
   2. Основные методы осуществления квантовых операций (оптика, импульсная СВЧ техника).
   3. Критерии Ди Винченцо: взгляд со стороны твердотельной электроники.
2. Основные понятия физики полупроводников
   1. Энергетические зоны в полупроводниках, закон дисперсии.
   2. Электроны и дырки, примесные состояния, барьеры, изгиб зон.
   3. Полупроводниковые гетероструктуры.
   4. Низкоразмерные квантовые структуры в полупроводниках (квантовые ямы, квантовые точки).
   5. Спин-орбитальное взаимодействие, g-фактор, сверхтонкое взаимодействие, обменное взаимодействие.
3. Полупроводниковые структуры для реализации квантовых вычислений
   1. Полупроводниковые квантовые точки, созданные с помощью затворных технологий на основе двумерного газа (схема Дэниэла Лосса и Дэвида Ди Винченцо).
   2. Эпитаксиальные квантовые точки в гетеросистемах А3B5, Ge/Si (экситонные, орбитальные и спиновые состояния).
   3. Двойные квантовые точки.
   4. Примесные состояния в полупроводниковой матрице (модель Кейна).
   5. NV-центры в алмазе.
4. Механизмы потери квантовой когерентности в полупроводниковых системах
   1. Тепловые флуктуации.
   2. Роль спин-орбитального взаимодействия.
   3. Сверхтонкое и обменное взаимодействие с окружением.
   4. Флуктуации электрического поля.
5. Проблемы создания полупроводниковых структур для реализации квантовых вычислений
   1. Масштабирование.
   2. Адресация кубитов.
6. Чтение спиновой информации
   1. Одноэлектронный транзистор.
   2. Оптические методы.
7. Заключение
   1. Организация взаимодействия между удаленными кубитами,
   2. Недостатки и преимущества существующих схем квантовых вычислений.
   3. Современное состояние исследований.

# Образовательные технологии

1. Мультимедийное представление лекционного материала в среде PowerPoint.
2. Реферирование публикаций на английском языке
3. Самостоятельная подготовка доклада с презентацией.

# Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Имеется (в электронной форме) конспект лекций по курсу и доступная учебно-научная литература.

# Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная проверка решения задач и выборочные опросы. Оценочным средством окончательного контроля является экзамен. Освоение компетенций оценивается по степени владения аппаратом теоретической физики в данной области, способностью решения базовых задач в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов.

Освоение компетенций оценивается по пятибалльной шкале. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформированы не ниже порогового уровняв полном объеме в той части, которая соответствует содержанию дисциплины.

## Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература

1. **М.Нильсен, И.Чанг** Квантовые вычисления и квантовая информация. — Москва, «Мир», 2006. — 824 с.

**8.1. Программное обеспечение для лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Таблица 8.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование ПО** | **Назначение** | **Место размещения** |
| 1 | Jaws for Windows | Программа экранного доступа к системным и офисным приложениям, включая интернет-обозреватели. Информация с экрана считывается вслух, обеспечивая возможность речевого доступа к самому разнообразному контенту. Jaws также позволяет выводить информацию на обновляемый дисплей Брайля. JAWS включает большой набор клавиатурных команд, позволяющих воспроизвести действия, которые обычно выполняются только при помощи мыши. | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ, компьютерные классы (сетевые лицензии) |
| 2 | Duxbury Braille Translator v11.3 для Брайлевского принтера | Программа перевода текста в текст Брайля, и печати на Брайлевском принтере | Ресурсный центр |
| 3 | "MAGic Pro 13" (увеличение+речь) | Программа для людей со слабым зрением и для незрячих людей. Программа позволяет увеличить изображение на экране до 36 крат, есть функция речевого сопровождения | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |

# Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Требуется аудитория с использованием мультимедийного проектора

Оборудование, обеспечивающее адаптацию электронных и печатных образовательных ресурсов для обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья

Таблица 9.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование оборудования** | **Назначение** | **Место размещения** |
|  | Принтер Брайля | Печать рельефно-точечным шрифтом Брайля | Ресурсный центр |
|  | Увеличитель Prodigi Duo Tablet 24 | Устройство для чтения и увеличения плоскопечатного текста | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Специализированное мобильное рабочее место «ЭлНот 311» | Мобильный компьютер с дисплеем брайля | Ресурсный центр |
|  | Портативный тактильный дисплей Брайля “Focus 40 Blue” | Навигация в операционных системах, программах и интернете с помощью отображения рельефно-точечным шрифтом Брайля получаемой информации | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Устройство для печати тактильной графики «PIAF» | Печать тактильных графических изображений | Ресурсный центр |
|  | Портативный видео-увеличитель RUBY XL HD | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Складной настольный электронный видео-увеличитель «TOPAZ PHD 15» | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Электронный ручной видео-увеличитель ONYX Deskset HD 22” | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Смартфон EISmart G3 | Смартфон клавишным управлением и озвученным интерфейсом, обучение спутниковой навигации. | Ресурсный центр |
|  | FM-система «Сонет-РСМ» РМ-3-1 | Звуковая FM-система для людей с нарушением слуха, улучшающая восприятие голосовой информации | Большая физическая аудитория главного корпуса НГУ |

**II. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы студентов, выполнению курсовых проектов и лабораторных работ**

ЗАДАЧИ

1. 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 1011см-2 .
2. Определить размер области пространственного заряда в слое кремния, легированного донорами с концентрацией 1016 см-2.
3. 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. 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. 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. 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. Рассчитать величину электрического поля, создаваемого затвором в системе Si /SiO2 и формирующего потенциальную яму c квантованием по оси Z, необходимую для обеспечения характерного размера волновой функции локализованного электрона *lz* =1 нм.

**III. Банк контролирующих материалов**

**Контрольные вопросы по курсу**

1. Объяснить основу преимущества квантовых вычислений над классическими.

2. Кремний и арсенид галлия, что лучше (по вашему мнению) для квантовых вычислений. Провести сравнение.

3. Методы адресации квантовых точек на основе двумерного газа.

4. Рассказать об основных механизмах потери когерентности в квантовых точках на основе двумерного газа.

5. Провести сравнение схемы квантовых вычислений с использованием локализованных состояний в квантовых точках и схемы, основанной на использовании примесных состояний. Выделить преимущества и недостатки.

6. Основные принципы импульсной СВЧ техники для управления состояниями кубитов.

7. Принцип работы одноэлектронного транзистора.

8. Рассказать о критериях Ди Винченцо на примере системы эпитаксиальных квантовых точек.

9. Модель Кейна и её реализация.

10. Электроны или дырки, что лучше (по вашему мнению) для квантовых вычислений?

11. Спин-орбитальное взаимодействие, неизбежное препятствие или подарок природы?

12. Как прочитать спиновую информацию?

13. Опишите идеальный полупроводниковый материал или идеальную полупроводниковую гетеросистему для квантовых вычислений. Какими (по вашему мнению) они должны быть?

14. Сверхтонкое взаимодействие, влияние на время когерентности в различных системах.

15. Обменное взаимодействие, роль в квантовых вычислениях.

16. Оптические методы управления кубитами.

17. Управление значением g-фактора как способ адресации кубитов.

18. Средства для организации удаленной связи между кубитами.

19. Масштабирование, методы создания рабочих схем с упорядоченным расположением кубитов.

20. Опишите наиболее перспективную (по вашему мнению) схему реализации квантовых вычислений на основе полупроводниковых структур.