

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Одноатомная одноэлектроника

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Одноатомная одноэлектроника» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые и оптические технологии». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области одноатомных одноэлектронных квантовых элементов и устройств на одноатомных зарядовых центрах, работающих на новых физических принципах. Среди всех возможных одноатомных зарядовых центров рассматриваются одиночные примесные атомы в полупроводниках и диэлектриках, выделенные атомы в молекулах, молекулярных кластерах и молекулярных каркасах. В курсе рассматриваются явление локализации электронов на примесных и выделенных атомах — одноатомных зарядовых центрах, а также их коррелированный перенос. Отдельное внимание уделяется особенностям и закономерностям эффективного одночастичного дискретного энергетического спектра электронов в примесных атомах и выделенных атомах, физическую и математическую модель и методам его параметризации в различных зарядовых и возбужденных состояниях и обусловленных им явлениями. Среди таких явлений можно выделить различные виды блокады туннельного тока: кулоновскую блокаду, блокаду Паули и спиновую блокаду во внешнем магнитном поле. Рассматриваются экспериментальные методы изготовления базовых одноатомных одноэлектронных элементов и прикладные вопросы создания на их основе элементов классической и квантовой памяти, квантовых битов, классических и квантовых резервуарных вычислительных сетей. Рассматриваются численные методы расчета транспортных характеристик одноатомных одноэлектронных элементов и устройств на их основе.

5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках дисциплин общей физики «Атомная физика», «Электромагнетизм» и теоретической физики «Квантовая механика», а также дисциплины «Дифференциальные уравнения».

7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего , часы	В том числе						
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
1. Введение Виды одноатомных транзисторов. Исторический обзор. Одноатомные одноэлектронные молекулярные транзисторы на металлоорганических молекулах. Одноатомные одноэлектронные структуры на металлоорганических каркасах. Одноатомные контактные транзисторы (сильносвязанные). Одноатомные одноэлектронный твердотельные структуры на примесных атомах. Оценки физических величин, размерные энергетические,		2			2	1 час Знакомство с обзорами по теме одноатомных транзисторов [1, 8].		1

емкостные, электрические характеристики.								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

2. Виды одноатомных транзисторов Одноатомные контактные транзисторы (сильносвязанные). Технология изготовления. Квантование проводимости. Формула Ландауэра. Эффект управления. Перспективы развития. Одноатомные молекулярные одноэлектронные транзисторы. Виды молекул. Особенности энергетического электронного спектра. Экспериментальное изготовление. Проблема нанозазоров. Метод электромиграции. Электротрэнпинг. Транспортные характеристики. Диаграммы стабильности одноатомных молекулярных одноэлектронных транзисторов. Обзор видов твердотельных одноатомных одноэлектронных транзисторов на примесных атомах. Транзисторы на примесных атомах в кремнии. Транзисторы на примесных атомах в оксиде кремния. Транзисторы на NV-центрах в алмазе. Другие виды полупроводников и диэлектриков. Сравнение характерных размеров и энергетических характеристик. Технологические требования.	4	3		7	1 час Вывод формулы Ландауэра для одноатомного транзистора. 1 час Демонстрация инвариантности уравнения самофокусировки в линзовых координатах [4]. 4 часа Повторение лекционного материала по теме «Виды одноатомных транзисторов».	5
---	---	---	--	---	---	---

3. Краткое введение в теорию классических одноэлектронных устройств. Одиночный туннельный контакт. Изменение электростатической и свободной энергии при туннелировании. Расчет темпа туннелирования в одиночном контакте. Туннельный гамильтониан. Золотое правило Ферми для туннельного эффекта. Основные одноэлектронные структуры и устройства. Одноэлектронный ящик (бокс). Энергетическая диаграмма одноэлектронного ящика. Одноэлектронный транзистор. Одноэлектронная ячейка памяти. Одноэлектронный насос. Одноэлектронный турникет. Понятие о блокаде туннельного тока. Диаграмма стабильности. Изменение электростатической и свободной энергии при туннелировании электрона. Расчет темпов туннелирования электронов и туннельного тока в классическом одноэлектронном транзисторе. Зарядовые состояния транзистора и их отображение на диаграмме стабильности. Граф состояний и переходов молекулярного одноэлектронного транзистора.		4	3	2 часа Коллоквиум по темам «Теория классических одноэлектронных устройств»	7	1 час Знакомство с теорией классических одноэлектронных устройств. 7 часов Подготовка к коллоквиуму		6
4. Теория одноэлектронной блокады в одноатомном случае. Полный гамильтониан одноатомного одноэлектронного транзистора. Уравнение Лиувилля — фон Неймана для полной матрицы плотности. Используемые приближения для описания электронного транспорта в одноатомных одноэлектронных устройствах. Редуцированная		2	2		4	1 час Самостоятельный повторный вывод уравнений для Система уравнений для матричных элементов матрицы плотности [2,5].		4

матрица плотности системы. Система уравнений для матричных элементов матрицы плотности. Функция распределения по числам заполнения. Система кинетических уравнений Паули. Темпы туннелирования и вероятности переходов. Энергетическая релаксация электронов в одноатомном зарядовом центре. Предельные случаи энергетической релаксации электронов в одноатомном зарядовом центре. Расчет туннельного тока через одноатомный центр в транзисторе. Квазистационарное приближение. Выражение для расчета туннельного тока в одноатомном одноэлектронном транзисторе через одночастичные функции распределения вероятностей. Простейшие модели одноатомного одноэлектронного транзистора. Одноатомный одноэлектронный транзистор с невырожденным и К-кратно вырожденным энергетическим электронным уровнем энергии. Одноатомный одноэлектронный транзистор с двумя невырожденными электронными энергетическими уровнями. Расчет туннельного тока через одноатомный транзистор для простейших моделей. Энергетический спектр примесных атомов в запрещенной зоне полупроводников и диэлектриков. Режим изолированных примесей. Примесные пары и режим полурастворения. Зонная структура примесей. Размерное квантование на примесных атомах. Энергетический спектр примесного атома фосфора в кремнии. Долинное расщепление. Строение эффективного потенциала в различных условиях. Кулоновский режим. Гибридный примесно-интерфейсный режим.					1 час Вывод соотношения между трехмерной спектральной плотностью изотропного случайного поля и его одномерной спектральной плотностью [6, стр. 36, §4] 2 часа Повторение лекционного материала по теме «Филаментация в случайно-неоднородной среде».		
--	--	--	--	--	--	--	--

Интерфейсный режим. Кулоновское взаимодействие. Эффективная собственная емкость примесного атома. Штарк эффект на примесных атомах в полупроводниках. Метод параметризации одночастичного энергетического спектра примесных атомов в различных зарядовых и возбужденных состояниях.							
5. Методы экспериментального изготовления одноатомных устройств СТМ-литография. Управляемая имплантация. Одноионный метод имплантации. Метод последовательного травления наномостиков. Методы экспериментального наблюдения одиночных примесных атомов. Атомная зондовая томография. Технологические перспективы. Измерение эффективного потенциала примесных атомов с помощью кельвиновской зондовой микроскопии.		2	1		3	1 час Повторение лекционного материала по теме «Методы экспериментального изготовления одноатомных устройств».	1
6. Прикладные аспекты одноатомной одноэлектроники Массивы примесных атомов. Перенос электронов в массивах одноатомных зарядовых центров. Кулоновская блокада, спиновая блока и блокада Паули. Методы измерения транспортных характеристик одноатомных одноэлектронных устройств. Диаграммы стабильности. Транспортная спектроскопия примесных атомов. Метод решения обратной задачи для восстановления		2	1		3	2 часа Повторение лекционного материала по теме «Прикладные аспекты одноатомной одноэлектроники».	2

одночастичных электронных спектров и определения констант взаимодействия. Определение значений параметрическая модели примесных атомов. Классические одноатомные одноэлектронные устройства. Примесные атомы как электронные ловушки. Ячейка памяти на примесных атомах. Одноатомный одноэлектронный турникет. Сложные одноатомные одноэлектронные устройства. Гибридные одноатомные-CMOS устройства. Полный одноатомный одноэлектронный сумматор. Однофотонно-одноэлектронные преобразователи на одноатомных одноэлектронных транзисторах. Принципы детектирования фотонов на одноатомных структурах. Фотонная разблокировка. Квантовые клеточные автоматы, резервуарные вычислительные сети на основе одноэлектронных одноатомных элементов и структур.							
7. Квантовые вычисления на примесных атомах Кубиты на примесных атомах. Электронные и ядерные спиновые состояния. Электронные и ядерные спиновые кубиты на примесных атомах. Спин-зарядовый конвертор. Метод считывания спинового состояния. Фазы работы кубита на примесных атомах. Характерные времена. Время когерентности и дефазировки. Использование массивов примесных атомов для передачи квантовой информации.		2	2			2 часа Повторение лекционного материала по теме «Квантовые вычисления на примесных атомах».	2

Промежуточная аттестация - зачет			4		4	15 часов Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).		15
Итого		18	16	2	36			36

* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

8.1 Основная и дополнительная литература доступная студентам через Интернет или по запросу лектору.

8.2 Электронные презентации основных тем дисциплины доступные через сайт лаборатории: <http://cryolab.phys.msu.ru/index.php/ru/>

9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Размерные, электрические и энергетические параметры одноатомных транзисторов различного типа
2. Формула Ландауэра для сильносвязанного одноатомного транзистора
3. Влияние дискретности энергетического спектра одноатомных зарядовых центров на величину кулоновской блокады
4. Характерная эффективная электрическая собственная емкость примесного атома в зависимости от энергии ионизации и сродства к электрону
5. Золотое правило Ферми для туннельного эффекта
6. Величина кулоновской блокады в зависимости от собственной и взаимной эффективной емкостей зарядового центра на примесном атоме
7. Виды токовых особенностей на токовых диаграммах стабильности одноатомных транзисторов
8. Уравнения кинетического баланса
9. Граф туннельных переходов одноатомного одноэлектронного транзистора
10. Спин-зарядовый конвертор

Типовые вопросы к зачету:

1. Виды одноатомных транзисторов.
2. Расчет темпа туннелирования в одиночном контакте.

3. Теория одноэлектронной блокады в одноатомном случае.
4. Система уравнений для матричных элементов матрицы плотности одноатомного одноэлектронного транзистора.
5. Предельные случаи энергетической релаксации электронов в одноатомном зарядовом центре.
6. Одноатомный одноэлектронный транзистор с K -кратно вырожденным энергетическим электронным уровнем энергии.
7. Метод параметризации одночастичного энергетического спектра примесных атомов в различных зарядовых и возбужденных состояниях.
8. СТМ-литография для создания одноатомных одноэлектронных устройств.
9. Основная формула одноэлектроники.
10. Измерение эффективного потенциала примесных атомов с помощью кельвиновской зондовой микроскопии.
11. Перенос электронов в массивах одноатомных зарядовых центров.
12. Кулоновская блокада, спиновая блока и блокада Паули.
13. Методы измерения транспортных характеристик одноатомных одноэлектронных устройств.
14. Классические одноатомные одноэлектронные устройства
15. Ячейка памяти на примесных атомах.
16. Одноатомный одноэлектронный турникет.
17. Гибридные одноатомные-CMOS устройства.
18. Полный одноатомный одноэлектронный сумматор.
19. Принципы детектирования фотонов на одноатомных структурах.
20. Фотонная разблокировка одноатомного одноэлектронного транзистора
21. Резервуарные вычислительные сети на одноатомных одноэлектронных структурах.
22. Квантовые клеточные автоматы. Реализации на одноатомных зарядовых центрах
23. Электронные и ядерные спиновые кубиты на примесных атомах.
24. Метод считывания спинового состояния в кубите на примесных атомах.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

ВЛАДЕТЬ: профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий (B1, СПК-1).

ВЛАДЕТЬ: навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий (B2, СПК-2).

ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (B3, СПК-3).

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

УМЕТЬ: осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий (З1, СПК-1).

ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (З2, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (З3, СПК-3).

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и система- тическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий

оптических технологий (В1, СПК-1).		технологий	технологий		
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий (В2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых и оптических технологий
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов
УМЕТЬ: осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий (У2, СПК-2).	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых и оптических технологий

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (УЗ, СПК-3)	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования
ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий (31, СПК-1)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых и оптических технологий

		технологий	технологий		
<i>ЗНАТЬ:</i> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (32, СПК-2).	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования
---	-------------------	---	---	---	--

10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. E. Prati, T. Shinada, Single-Atom Nanoelectronics, CRC Press, 2013
2. C. Wasshuber. Computational Single-Electronics. Computational Microelectronics. Springer Vienna, 2001.
2. R. Mohsen. Quantum Theory Of Tunneling (2nd Edition). World Scientific Publishing Company, 2013.
4. S. Bandyopadhyay and H.S. Nalwa. Quantum dots and nanowires. American Scientific Publishers, 2003.
5. H. Grabert and M.H. Devoret. Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena In Nanostructures. Nato Science Series B:. Springer US, 2013.
6. K.K. Likharev. Correlated discrete transfer of single electrons in ultrasmall tunnel junctions. IBM Journal of Research and Development, 32(1):144–158, 1988.

Дополнительная литература

7. W. Han • Z.M. Wang. Toward Quantum FinFET, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology Volume 17. Springer, 2013.
8. M. Fuechsle и др., A single-atom transistor, Nature Nanotechnology 7, 242, 2012, 10.1038/nnano.
9. C.C. Escott, F.A. Zwanenburg, A. Morello, Resonant tunnelling features in quantum dots, Nanotechnology 21, 274018, 2010
10. Z.A.K. Durrani, Single-electron Devices and Circuits in Silicon. Imperial College Press, 2010.
11. H. J. Reittu, Fermi's golden rule and Bardeen's tunneling theory, Am. J. Phys., V.63 (10), pp. 940-944, 1995
12. J.M. Seminario. Molecular and Nano Electronics: Analysis, Design and Simulation. Theoretical and Computational Chemistry. Elsevier Science, 2006.

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

- <http://www.iue.tuwien.ac.at/software/simon/>
- <http://simulation.sourceforge.net/>
- <https://nanohub.org/tags/singleatomtransistor>
- <http://www.nwchem-sw.org>
- <http://classic.chem.msu.su/gran/gamess/index.html>
- <https://www.csc.fi/web/elmer>
- <https://openfoam.org/>
- http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/detail.php?ID=2691

12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Для большей части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте кафедры. Рекомендуется перед лекцией скачать соответствующую презентацию и иметь ее на интерактивном занятии на ноутбуке или планшете в режиме off-line или в распечатанном виде, используя как основу конспекта для собственных пометок и комментариев.

13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости):

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Одноатомная одноэлектроника» используются средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайтов с материалами лекций и семинарских занятий. Курс имеет электронные версии (презентации) лекций. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской.