

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Сверхпроводящие когерентные наноструктуры  
для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»  
для направления 03.06.01 Физика и астрономия,  
профиль «Физика конденсированного состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

## **Правительство Российской Федерации**

### **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"**

#### **Программа дисциплины**

#### **«Сверхпроводящие когерентные наноструктуры для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»**

для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Физика конденсированного  
состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Автор программы:

Рязанов Валерий Владимирович,

профессор, e-mail: [ryazanov@issp.ac.ru](mailto:ryazanov@issp.ac.ru) ,

Москва - 2017

*Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.*

## **1. Область применения и нормативные ссылки**

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспиранта по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» профиля «Физика конденсированного состояния» и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину, и аспирантов направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Физика конденсированного состояния».

Программа разработана в соответствии с:

- Образовательным стандартом НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»;
- Образовательной программой «Физика и астрономия» подготовки аспиранта.
- Учебным планом подготовки аспирантов по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль «Физика конденсированного состояния», утвержденным в 2014.

**2. Цели освоения дисциплины:** получение фундаментальных знаний в области нанофизики мезоскопических квантовых структур, физики сверхпроводящих когерентных систем (джозефсоновских систем), углубленных представлений о спектре одночастичных возбуждений в сверхпроводниках, механизмах их конверсии в сверхпроводящие (куперовские) пары в различных искусственных многослойных и многотерминальных гибридных структурах на основе сверхпроводников, нормальных металлов и ферромагнетиков. Кроме того, освоение дисциплины должно способствовать формированию профессиональных компетенций, в частности, связанных с возможностью применения полученных знаний для разработки новых элементов и подходов в сверхпроводниковой цифровой и квантовой электронике.

## **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

**Знать:**

- основные современные модели и подходы к описанию когерентных и неравновесных процессов в гибридных сверхпроводниковых наноструктурах,
- перспективы развития устройств наноэлектроники и спинтроники на основе гибридных сверхпроводниковых структур,

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Сверхпроводящие когерентные наноструктуры

для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»

для направления 03.06.01 Физика и астрономия,

профиль «Физика конденсированного состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

- современные нанотехнологические методы и методы исследования наноструктур,
- методы математической обработки результатов экспериментальных исследований.

**Уметь:**

- проектировать экспериментальные структуры и выполнять экспериментальные исследования гибридных сверхпроводниковых систем с использованием современного автоматизированного экспериментального оборудования,
- формулировать перспективные задачи исследований на основе современных трендов развития устройств нанoeлектроники и спинтроники на основе гибридных сверхпроводниковых структур,
- использовать передовые отечественные и зарубежные достижения в области изучения когерентных и неравновесных процессов в гибридных сверхпроводниковых структурах при проведении научных исследований и разработки перспективных приборов и устройств на их основе.

**Иметь навыки (приобрести опыт):**

- в использовании современных моделей и подходов к описанию когерентных и неравновесных процессов в гибридных сверхпроводниковых структурах,
- владеть методологией теоретических и экспериментальных исследований в области изучения сверхпроводниковых низкоразмерных систем.

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие компетенции:

Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ)	Код по ОС НИУ ВШЭ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений,	УК-1	Демонстрирует способность к критическому анализу и оценке современных научных дости-	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
 Программа дисциплины «Сверхпроводящие когерентные наноструктуры

для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»

для направления 03.06.01 Физика и астрономия,

профиль «Физика конденсированного состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях		жений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	
Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	УК-3	Демонстрирует готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	УК-4	Демонстрирует готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность выполнять экспериментальные исследования в области физики сверхпроводниковых гибридных наноструктур.	ПК-1	Демонстрирует способность выполнять экспериментальные исследования в области физики сверхпроводниковых гибридных наноструктур.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность выполнять экспериментальные исследования в области физики неравновесных процессов в гибридных	ПК-2	Демонстрирует способность выполнять экспериментальные исследования в области физики неравновесных	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.

сверхпроводящих системах.		процессов в гибридных сверхпроводящих системах.	
Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области фундаментальной и прикладной физики с использованием современных технологических и физических методов в области создания физических основ информационно-коммуникационных технологий.	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных технологических и физических методов в области создания физических основ информационно-коммуникационных технологий.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	ОПК-2	Демонстрирует способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.

#### 4. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Физика конденсированного состояния».

Изучение данной дисциплины базируется на следующих базовых дисциплинах:

- Физика
- Математика

для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»

для направления 03.06.01 Физика и астрономия,

профиль «Физика конденсированного состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

- Иностранный язык

Для освоения учебной дисциплины, аспиранты должны владеть следующими знаниями и компетенциями:

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6),
- готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранных языках (УК-4).

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при подготовке научных статей и докладов, в преподавательской деятельности аспиранта.

### 5. Тематический план учебной дисциплины

№	Название темы	Всего часов	Аудиторные часы		Самостоятельная работа	
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Когерентные и неравновесные процессы в гибридных сверхпроводящих структурах с туннельными и нормально-металлическими слоями.	40	8			32
2	Сверхпроводниковая джозефсоновская цифровая электроника.	12	2			10
3	Сверхпроводниковые гибридные структуры с ферромагнитными слоями. Спиновые переключатели и – контакты. Спиновый	22	4			18

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
 Программа дисциплины «Сверхпроводящие когерентные наноструктуры

для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники»

для направления 03.06.01 Физика и астрономия,

профиль «Физика конденсированного состояния» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

	разбаланс. Сверхпроводящая спинтроника.					
4	Джозефсоновские структуры и процессы, проявляющие квантовый предел. Дуализм заряд-сверхпроводящая фаза. Сверхпроводящие кубиты. «Одноэлектроника» и джозефсоновская квантовая логика.	40	8			32
	<b>Итого</b>	114	22			92

### 6.Формы контроля знаний аспирантов

Тип контроля	Форма контроля	Полугодие	Параметры
		2	
Текущий	<i>Домашнее задание по изучению научной литературы</i>	2 полугодие, 5-7 неделя.	Поочередное обсуждение изученных научных публикаций по тематике курса.
Промежуточный	<i>Контрольная работа</i>	2 полугодие, 7 неделя	Представление письменных работ с решением задач по тематике курса.
Итоговый по дисциплине	<i>Экзамен</i>	После окончания курса	Устный опрос. По 3 вопроса по курсу.

## 7. Критерии оценки знаний, навыков

**Текущий контроль** знаний по дисциплине «Сверхпроводящие когерентные наноструктуры для сверхпроводниковой цифровой и квантовой электроники» осуществляется путем оценки усвоения материала при обсуждении научных публикаций по теме курса, изучаемых аспирантами в качестве домашнего задания.

**Промежуточный контроль** знаний проводится в форме письменной контрольной работы по решению задач.

**Промежуточный контроль** знаний представляет собой устный экзамен.

## 8. Порядок формирования оценок по дисциплине

Итоговая оценка по курсу формируется следующим образом:

$$O_{\text{итоговая}} = 0.2_{\text{дом задание}} + 0.2_{\text{контр работа}} + 0.6_{\text{экзамен}}$$

## 9. Содержание дисциплины

**Тема 1.** Когерентные и неравновесные процессы в гибридных сверхпроводящих структурах с туннельными и нормально-металлическими слоями.

Эффект Ааронова-Бома и макроскопическая квантовая когерентность в сверхпроводниках. Основное состояние и квазичастицы в сверхпроводниках. Андреевское отражение на границе раздела нормальный металл (N)-сверхпроводник (S). Конверсия неравновесных квазичастиц в куперовские пары. Проводимость NS границы раздела. Туннельный контакт сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS контакт). NS-NIS кроссовер. Эффекты Джозефсона в SNS и SIS контактах. Центры проскальзывания фазы и волны зарядового разбаланса.

Количество часов аудиторной работы – 8

Общий объем самостоятельной работы – 32

**Тема 2.** Сверхпроводниковая джозефсоновская цифровая электроника.

Туннельные и резистивно-шунтированные джозефсоновские контакты, их вольт-амперные характеристики, физический смысл параметра МакКамбера. Ступени Шапиро и стандарт Вольта. Двухконтактный интерферометр как базисная ячейка сверхпроводящей электроники, сквид и параметр сквида. Цифровые состояния быстрой одноквантовой (RSFQ) логики. Джозефсоновский



RSFQ-триггер и другие элементы сверхпроводящей цифровой логики. Преимущества и проблемы сверхпроводящей цифровой электроники.

Количество часов аудиторной работы – 2

Общий объем самостоятельной работы – 10

**Тема 3.** Сверхпроводниковые гибридные структуры с ферромагнитными слоями. Спиновые переключатели и –контакты. Спиновый разбаланс. Сверхпроводящая спинтроника.

Проблемы сосуществования сверхпроводимости (S) и ферромагнетизма (F). Особенности эффекта близости на FS границе раздела, знакопеременные пространственные осцилляции сверхпроводящего параметра порядка. Джозефсоновский SFS контакт и инверсия сверхпроводящей разности фаз ( $\square$ -состояние). Переход в  $\square$ -состояние и проявление высших Фурье-компонент джозефсоновского ток-фазового соотношения. Инверторы сверхпроводящей фазы и их возможные применения в сверхпроводящей электронике. Сверхпроводящие спиновые клапаны и джозефсоновские магнитные переключатели. Спиновый разбаланс. Релаксация зарядового и спинового разбалансов в SF-структурах. Кросс-андреевское отражение. Различные элементы сверхпроводящей спинтроники.

Количество часов аудиторной работы – 4

Общий объем самостоятельной работы – 18

**Тема 4.** Джозефсоновские структуры и процессы, проявляющие квантовый предел. Дуализм заряд-сверхпроводящая фаза. Сверхпроводящие кубиты. «Одноэлектроника» и джозефсоновская квантовая логика.

Субмикронные туннельные контакты и кулоновская блокада. Одноэлектронный бокс и одноэлектронный транзистор. «Уравнение движения» джозефсоновского контакта, переход в квантовый предел. Дуализм заряд-сверхпроводящая фаза в субмикронных джозефсоновских контактах и квантовых центрах проскальзывания фазы. Тепловые и квантовые флуктуации. Сверхпроводящие кубиты. Сверхпроводящие копланарные резонаторы и дисперсионное считывание состояний кубитов. Спектры кубитов, однотоновая и двухтоновая спектроскопия. Состояния кубита на сфере Блоха. Манипулирование состояниями кубита с помощью микроволновых импульсов. Квантовые компьютеры и квантовые симуляторы.

Количество часов аудиторной работы – 8

Общий объем самостоятельной работы – 32

## **10. Оценочные средства для текущего контроля и аттестации аспиранта**

### **Примеры задач промежуточного контроля.**

1. Рассчитать долю неравновесных квазичастиц, проходящих через NS границы в сверхпроводящие домены совершенного монокристалла ниобия, находящегося в промежуточном состоянии, при приведенной температуре  $T/T_c=0.96$  и транспортном токе, перпендикулярном границе раздела. Использовать табличные значения для температурно-зависящей энергетической щели. Андреевским отражением для энергий выше щели пренебречь.

2. Рассчитать минимальный размер базисной RSFQ ячейки при технологии изготовления туннельных SIS контактов с плотностью критического тока  $1 \text{ кА/см}^2$ .

3. Рассчитать минимальную толщину F-слоя в джозефсоновском SFS  $\square$ -контакте, если используется диффузный ферромагнитный слой с температурой Кюри  $T_k=50 \text{ К}$  и коэффициентом электронной диффузии  $5 \text{ см/с}$ . (Оценить обменную энергию по формуле  $E_{ex} \sim k_B T_k$ ).

4. Рассчитать джозефсоновскую и кулоновскую энергии джозефсоновского перехода  $\text{Al-AlO}_x\text{-Al}$  с латеральными размерами  $0.1 \times 0.1 \text{ мкм}^2$ , толщиной окисного слоя  $1 \text{ нм}$  и плотностью критического тока  $0.3 \text{ кА/см}^2$ .

## 11. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

### Литература:

1. В.В.Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. -М. , "Наука", 1982.
2. Т.Ван Дузер, Ч.У.Тернер. Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. - М., "Радио и связь" , 1984.
3. М. Тинкхам. Введение в сверхпроводимость. -М. "Атомиздат" , 1980.
4. А.Н. Омелянчук, Е.В. Иличев, С.Н. Шевченко. Квантовые когерентные явления в джозефсоновских кубитах. Киев, • «Наукова думка», • 2013.

## 12. Образовательные технологии

На лекциях и по итогам выполнения домашних заданий проводится разбор практических задач с оценкой практически важных параметров структур и устройств.

## 13. Материально-техническое обеспечение дисциплины

.Стационарный компьютер или ноутбук, проектор.