

Институт физики микроструктур РАН —  
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ  
Врио директора ИФМ РАН  
\_\_\_\_\_ З.Ф.Красильник

"11" апреля 2016 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Туннельные явления в нанозифике

Направление подготовки

*11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»*

Направленность (профиль) программы

*05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и нанозлектроника, приборы на квантовых эффектах»*

Квалификация (степень) выпускника

*исследователь - преподаватель, исследователь*

Форма обучения

*очная*

Нижний Новгород

2016

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

Дисциплина «Туннельные явления в нанофизике» является факультативной дисциплиной программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, квантовой механики, статистической физики и электродинамики, физики твердого тела. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области твердотельных наноструктур.

Дисциплина изучается на 3 курсе (6 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование у аспирантов современного представления об основных свойствах твердотельных структур с туннельной связью;
- формирование у аспирантов компетенций программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции</b>	<b>Результаты освоения ООП Содержание компетенций</b>	<b>Перечень результатов планируемых обучения по дисциплине</b>
<b>ПК-1</b>	способность самостоятельно проводить научные исследования в области твердотельной электроники и применять полученные результаты для решения практических задач	<b>ЗНАТЬ:</b> основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области твердотельной электроники. <b>УМЕТЬ:</b> использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области твердотельной электроники. <b>ВЛАДЕТЬ:</b> разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области твердотельной электроники и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.

<p><b>ПК-2</b></p>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения. <b>УМЕТЬ:</b> понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой. <b>ВЛАДЕТЬ:</b> основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>
<p><b>ПК-3</b></p>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области твердотельной электроники.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования. <b>УМЕТЬ:</b> выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность. <b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных; навыками статистического анализа экспериментальных данных; навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>

**3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам занятий) и на самостоятельную работу обучающихся**

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

### 3.1. Объём дисциплины по видам учебных занятий (в часах)

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>Зачет</b>

### 3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

№	Раздел дисциплины	Всего	Контактная работа		Самостоятельная работа
			Лекционные занятия	Практические занятия	
1	Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения	12	2	2	8
2	Квазиклассическое описание туннелирования	24	4	4	16
3	Квазистационарные состояния в квантовой механике	12	2	2	8
4	Метод туннельного гамильтониана	24	4	4	16
5	Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	12	2	2	8
6	Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов	12	2	2	8
7	Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов	12	2	2	8
	<b>Дисциплина в целом</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>

### 3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

№	Наименование раздела дисциплины	Содержание
1	Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения	Цели и задачи курса. Описание электронных волн в твердых телах с помощью уравнения Шредингера. Обсуждение аналогии между туннельным эффектом в квантовой механике и непропусканием в средах с мнимым волновым вектором (полное внутреннее

		отражение). Граничные условия для волновой функции. Матричная форма записи связи амплитуд распространяющихся мод в областях с постоянным потенциалом. Основные свойства матрицы рассеяния. Основные свойства трансфер-матрицы. Обсуждение основных одноэлектронных и многоэлектронных задач туннелирования в твердых телах. Расчет коэффициентов отражения и прохождения от прямоугольного потенциального барьера. Расчет уровней размерного квантования частицы в одномерной прямоугольной потенциальной яме конечной высоты. Резонансное туннелирование через двухбарьерную структуру, форма линии резонансного прохождения (Брейта-Вигнера). Уровни размерного квантования в туннельно-связанных потенциальных ямах. Представление о времени туннелирования. Туннельный эффект в одномерных периодических структурах (задача Кронига-Пенни). Зонный спектр.
2	Квазиклассическое описание туннелирования	Приближение Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна и его область применимости. Свойства волновой функции вблизи точки поворота (связь осциллирующих и затухающих решений). Метод Миллера и Гуда. Расчет коэффициентов отражения и прохождения частицы через параболический потенциальный барьер. Расчет коэффициентов отражения и прохождения частицы через потенциальный барьер произвольной формы, сравнение с точным решением. Спектр состояний частицы, локализованной в одномерной потенциальной яме произвольного вида. Формула квантования Бора-Зоммерфельда. Расчет спектров состояний для частицы, локализованной в связанных потенциальных ямах.
3	Квазистационарные состояния в квантовой механике	Определение квазистационарных состояний. Связь скорости распада с прозрачностью туннельного барьера. Распад квазистационарных состояний в двухбарьерном потенциале. Распад квазистационарных состояний в сферически-симметричном потенциале. Альфа-распад, формула Гамова.
4	Метод туннельного гамильтониана	Вывод общего выражения для туннельного тока в плоскостной структуре «нормальный металл – изолятор – нормальный металл», связь полученного выражения с формулой Ландауэра. Расчет туннельного тока между нормальными металлами в приближении эффективной массы для случаев малых и больших смещений.
5	Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	Туннельная проводимость и закон Ома. Холодная полевая эмиссия и формула Фаулера-Нордхейма. Расчет туннельного тока между нормальными металлами через уровни размерного квантования двумерного электронного газа (резонансно-туннельный диод). Принцип работы электронного эмиссионного

		микроскопа. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа. Задача о туннельном токе между монокристаллом с плоской поверхностью и металлической сферой (задача Терсоффа – Хаманна). Локальная плотность состояний. Представление о туннельной микроскопии и спектроскопии. Одноэлектронный транзистор и кулоновская блокада туннелирования.
6	Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов	Квазичастицы в сверхпроводниках. Плотность состояний квазичастичных возбуждений, энергетическая щель. Квазичастичное туннелирование в системах «сверхпроводник – изолятор – нормальный металл» и «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» в приближении малопрозрачного туннельного барьера. Туннельная спектроскопия сверхпроводящей щели. Конверсия сверхпроводящего тока в нормальный ток и андреевское отражение в системе «сверхпроводник – нормальный металл». Стационарный эффект Джозефсона. Переход Джозефсона в магнитном поле. Принцип работы двухконтактного сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД). Джозефсоновские вихри. Принцип работы перестраиваемого генератора, основанного на движении квантов магнитного потока. Нестационарный эффект Джозефсона. Ступеньки Шапиро. Реализация квантового стандарта напряжения на джозефсоновском переходе в поле электромагнитной волны.
7	Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов	Независимые решения одномерного уравнения Паули. Рассеяние спин-поляризованной частицы на потенциальном барьере между двумя ферромагнитными металлами с разной намагниченностью. Принцип работы туннельного магниторезистивного элемента. Принцип работы спин-поляризованной сканирующей туннельной микроскопии.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

#### 4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и

индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных задач физики туннельных явлений.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

## **6. Фонд оценочных средств по дисциплине**

### **6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы**

1. Записать матрицу распространения для случая наклонного падения частицы на одномерный потенциальный барьер. Рассчитать вероятность отражения и прохождения в этом случае.
2. Используя метод матрицы распространения рассчитать энергетический спектр частицы в одномерной потенциальной яме конечной высоты. Рассмотреть симметричный и несимметричный случаи.
3. Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр частицы в двух связанных потенциальных ямах.

4. Используя метод матрицы распространения рассчитать спектр разрешенных состояний для электрона в периодическом потенциале  $U(x)$ :  $U(x)=0$  при  $0 < x < a$  и  $U(x)=U_0$  при  $a < x < b$ , где  $a+b$  – период структуры (модель Кронига-Пенни).
5. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в потенциальной яме.
6. Используя ВКБ-метод рассчитать уровни энергии частицы в двух связанных потенциальных ямах.
7. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов, при  $T=0$ .
8. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при  $T=0$ .
9. Рассчитать вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из сверхпроводника и нормального металла, при  $T=0$ .
10. Рассчитать квазичастичную ветку вольт-амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух одинаковых сверхпроводников, при  $T=0$ .
11. Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля.
12. Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе.
13. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о стационарном эффекте Джозефсона).
14. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о нестационарном эффекте Джозефсона).

## 6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания изученного материала;
- способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

Оценка	Уровень подготовки
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение



	<p>применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>

## 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

### а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том III. «Квантовая механика». М.: Наука. 2002.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая

- физика. Часть 1». М.: Наука. 1976.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том VIII. «Электродинамика сплошных сред». М.: Наука. 1982.
  4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., курс "Теоретическая физика", Том X. «Физическая кинетика». М.: Наука. 1979.
  5. Абрикосов А.А., «Основы теории металлов», М.: Физматлит, 2010.
  6. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». Москва: Наука, 1992.
  7. Де Жен П., «Сверхпроводимость металлов и сплавов». М.: Мир, 1968.
  8. Аладышкин А.Ю. «Туннельные явления в нанофизике». Электронное учебное пособие ([http://www.unn.ru/books/met\\_files/Aladyshkin\\_1.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/Aladyshkin_1.pdf)).

б) дополнительная литература:

9. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». М.: Наука, 1983.
10. Бом Д., «Квантовая теория» М.: Наука, 1965
11. Брандт Н.Б. и Кульбачинский В.А. «Квазичастицы в физике конденсированного состояния». М.: Физматлит, 2005.
12. Ketterson J.B. and Song S.N., «Superconductivity». Cambridge University Press. 1999.
13. Chen C.J. «Introduction to scanning tunneling microscopy». Oxford University Press, New York, 1993.
14. Datta S. «Electronic transport in mesoscopic systems». Cambridge University Press, 2005.
15. Лесовик Г.Б. и Садовский И.А. «Описание квантового электронного транспорта с помощью матриц рассеяния». Успехи физических наук, т. 181, стр. 1041–1096 (2011) (<https://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/>).
16. Bardeen J., «Tunnelling from a many-particle point of view». Phys. Rev. Lett., vol. 6, p. 57 (1961).
17. Blonder G.E., Tinkham M. and Klapwijk T.M. «Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion». Phys. Rev. B, vol. 25, p. 4515 (1982).
18. Tersoff J. and Hamann D.R. «Theory and application for the scanning tunneling microscope». Phys. Rev. Lett., vol. 50, 1998 (1983).
19. Slonczewski J.C. «Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier». Phys. Rev. B, vol. 39, 6995 (1989).
20. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>)
21. Reviews of Modern Physics (RMP) (<https://journals.aps.org/rmp/>)
22. Physical Review B (PRB) (<https://journals.aps.org/prb/>)
23. Superconductor Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/journal/0953-2048>)

в) факультативная литература

1. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». М: Логос, 2000
2. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». Москва: Мир, 1974.
3. Фрёман Н. и Фрёман П.О. «ВКБ-приближение». Москва: Мир, 1967.

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

Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Free Origin Viewer.

## **9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

### **Составитель:**

Аладышкин А.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН.

### **Рецензент:**

Курин В.В., д.ф.-м.н., зав. отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН