

КАФЕДРА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Заведующий кафедрой: д-р физ.-мат. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ,
А. С. Терехов

Направление подготовки: 510104 – Физика полупроводников. Микроэлектроника
Базовый институт: Институт физики полупроводников СО РАН

Кадровый состав

Альперович Виталий Львович, д-р физ.-мат. наук, проф.

Двуреченский Анатолий Васильевич, д-р физ.-мат. наук, проф.

Квон Зе Дон, д-р физ.-мат. наук, проф.

Латышев Александр Васильевич, д-р физ.-мат. наук, доц.

Погосов Артур Григорьевич, канд. физ.-мат. наук, доц.

Чаплик Александр Владимирович, чл.-корр. РАН, проф.

Чикичев Сергей Ильич, зам. зав. кафедрой, канд. физ.-мат. наук, доц.

История и сегодняшний день кафедры

Основана в 1963 г. акад. А. В. Ржановым, который возглавлял ее более 25 лет. С 1990 г. кафедрой заведует ее выпускник проф. А. С. Терехов. С момента образования кафедра готовит высококвалифицированных исследователей в области физики и техники полупроводников, создания и исследования полупроводниковых микро- и наноструктур, а также эпитаксиального роста тонких пленок, т. е. по всем основным направлениям научных исследований Института физики полупроводников СО РАН – единственного в России академического института, специализирующегося в этой важнейшей области знаний.

Система подготовки специалистов на кафедре двухуровневая: первая ступень – основное базовое четырехлетнее образование, завершается защитой квалификационной работы бакалавра; вторая – двухгодичная магистратура – защитой магистерской диссертации.

Выпускники кафедры подготовлены для работы в области физики и техники полупроводников, физики структур пониженной размерности, процессов микро- и нанотехнологии, физикохимии и технологии поверхности и межфазных границ, микро- и

наноэлектроники. Выпускники кафедры могут работать также преподавателями дисциплин физико-математического профиля в школах, колледжах и вузах России. Лучшие выпускники магистратуры проходят обучение в аспирантуре.

Научно-исследовательская работа студентов проводится в базовом институте кафедры – Институте физики полупроводников СО РАН. Директор ИФП – чл.-корр. РАН А. Л. Асеев.

Подготовка специалистов на кафедре реализуется известными российскими научными школами, получившими мировое признание, а также в рамках учебно-научного центра «Технология и физика полупроводниковых наноструктур», созданного и функционирующего в рамках федеральной целевой программы «Интеграция».

Высокий уровень подготовки специалистов на кафедре физики полупроводников обеспечивается оптимальным выбором постоянно обновляемых спецкурсов, правильным сочетанием экспериментальных и теоретических методов с широким использованием компьютерной техники, наличием высококвалифицированного профессорско-преподавательского состава, современного научного и технологического оборудования, учебной литературы.

Программа обучения на кафедре предусматривает получение студентами базовых знаний по физике, технике и материаловедению полупроводников, а также необходимых умений и навыков практической работы в области современных высоких технологий. Особое внимание при этом уделяется способам создания и изучения электронных, оптических и структурных свойств полупроводниковых микро- и нанообъектов, физикохимии и атомной инженерии поверхности и границ раздела, исследованию элементарных процессов эпитаксиального роста полупроводниковых слоев.

Студенты, специализирующиеся на кафедре, имеют возможность работать на современном высококлассном эксперимен-

тальном оборудовании ведущих мировых производителей, а также на уникальных физических и технологических комплексах собственного изготовления, которыми располагает ИФП СО РАН.

За время существования кафедры на ней специализировались и защитили дипломные работы более 400 студентов, из них более 100 защитили кандидатские, а 16 – докторские диссертации (5 докторов наук – выпускников кафедры ведут преподавательскую деятельность на кафедре). Среди выпускников – лауреаты Государственных премий СССР и России.

Специализация

Учебный план кафедры представляет собой систему спецкурсов, охватывающих весь период обучения (с третьего по шестой курс).

Студентам третьего года обучения читаются спецкурсы «Введение в специальность» и «Кристаллофизика полупроводников». Первый из них состоит из восьми разделов, в которых отражено основное содержание курса физики полупроводников. Каждый раздел начинается с установочной лекции, после которой проводятся реферативные семинары и демонстрационные лабораторные работы по этой же теме. На семинарских и лабораторных занятиях, тесно увязанных с лекциями, продолжается более углубленное знакомство с современными задачами физики полупроводников, методами их решения и с современной экспериментальной техникой. Этот спецкурс наряду с предметным обучением преследует и цель ознакомления с основными направлениями исследований в ИФП СО РАН, что позволяет студентам более осознанно выбирать соответствующие задачи и руководители дипломных работ.

В рамках трехсеместрового курса «Кристаллофизика полупроводников» студенты осваивают базовые понятия кристаллографии, знакомятся с атомным устройством полупроводниковых кристаллов, дифракционными методами исследования их структуры, классификацией и способами изучения собственных точечных и примесных дефектов, а также дислокаций. Два раздела спецкурса посвящены физико-химическим основам получения объемных кристаллов и тонких эпитаксиальных слоев полупроводников, а также процессам их легирования.

На четвертом году обучения студенты слушают спецкурсы «Теория твердого тела» и «Физика тонких полупроводниковых слоев и низкоразмерных систем». В первом излагается теория фононных и электронных спектров твердых тел, электрон-фононного и электрон-электронного взаимодействия, кинетических явлений в полупроводниках в классическом и квантовом пределах.

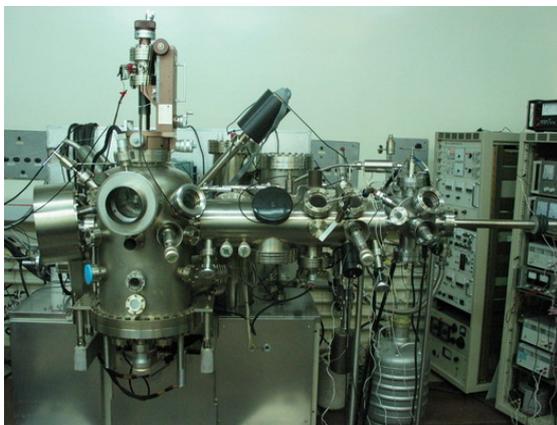
Второй спецкурс посвящен физике электронных процессов в базовых элементах современной полупроводниковой микроэлектроники: в контактах металл – полупроводник, гетерпереходах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник, включая квантовые эффекты в высокоподвижном двумерном электронном газе и физику мезоскопических явлений.

На первом курсе магистратуры читаются спецкурсы «Радиационная физика полупроводников», «Оптические процессы в полупроводниках», «Физические основы нанотехнологии» и «Гетероэпитаксия 1: механизмы роста кристаллов, кинетика и процессы массопереноса». В рамках этих спецкурсов студенты получают углубленные знания о фундаментальных процессах взаимодействия ускоренных пучков ионов и электронов с полупроводниковыми кристаллами, процессах поглощения и генерации фотонов в полупроводниковых структурах, методах создания и исследования объектов нанометрового масштаба, а также их применении в современных полупроводниковых приборах. На последний год обучения отнесены спецкурсы «Гетероэпитаксия 2» и «Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах», в которых излагаются последние достижения этих важнейших разделов современной технологии и физики полупроводников.

Научные направления

В лаборатории неравновесных явлений в полупроводниках под руководством проф. А. С. Терехова проводятся исследования морфологии, атомных реконструкций и электронных свойств поверхностей полупроводниковых соединений A^3B^5 с адсорбированными слоями цезия и кислорода, а также физических явлений, определяющих энергетические и угловые распределения электронов при эмиссии из полупроводников с отрицательным электронным сродством (ОЭС). Второе направление работы ла-

боратории состоит в создании новых технологий, конструировании и изготовлении вакуумно-полупроводниковых фотоэлектронных приборов с физически предельными характеристиками.

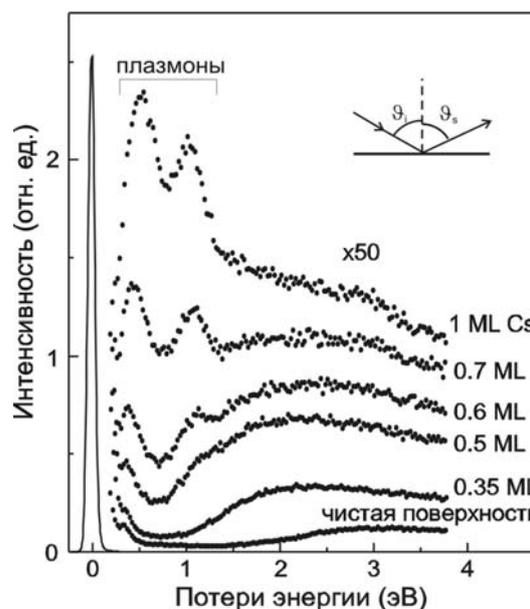


Электронный спектрометр ADES-500

За последние годы в лаборатории создана универсальная и эффективная низкотемпературная методика приготовления атомарно-чистых поверхностей GaAs с заданной стехиометрией и атомной структурой, сохраняющая рельеф исходной поверхности [1]; установлена возможность понижения температуры сверхструктурных фазовых переходов на поверхности GaAs под воздействием адсорбции электроположительных атомов цезия [2, 3]; на основе p-GaAs(Cs, O) фотокатодов созданы уникальные криогенные источники спин-поляризованных электронов с предельно узким распределением по энергии, предназначенные для экспериментов в физике твердого тела, атомной физике и физике элементарных частиц [4]; изучены энергетические и угловые распределения фотоэлектронов, эмитированных из полупроводников с ОЭС, и обнаружен эффект «преломления» электронов при переходе из полупроводника в вакуум [5].

Атомная структура и электронные свойства поверхности полупроводников изучаются с помощью современных сверхвысоковакуумных методов, в том числе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, дифракции медленных электронов, спектроскопии потерь энергии электронов, спектроскопии фотоотражения. На фотографии показан сверхвысоковакуумный электронный спектрометр ADES-500, на котором изучен фазовый переход от газа изолированных адатомов к двумерным металлическим островкам при адсорбции цезия на поверхности

GaAs [6]. Зарождение металлической фазы регистрировалось по возникновению плазменных пиков в спектрах потерь энергии электронов, показанных на рисунке. Фазовый переход обусловлен тем, что при увеличении степени покрытия диполь-дипольное отталкивание цезиевых адатомов, благодаря эффекту деполяризации, сменяется притяжением из-за образования латеральной металлической связи.



Пороговый рост интенсивности пиков локальных плазмонов в спектрах энергетических потерь электронов при адсорбции цезия на поверхности GaAs

Под руководством д-ра физ.-мат. наук А. В. Латышева проводятся исследования атомного строения поверхности, границ раздела и дефектов структуры в полупроводниковых материалах и развиваются методы современной электронной и зондовой микроскопии для анализа и создания твердотельных систем пониженной размерности. При активном участии студентов НГУ выполнен цикл пионерских работ по изучению структурных перестроек на поверхностях кремния, которые внесли принципиально новое понимание в физику формирования субмонослойных покрытий. Впервые был теоретически обоснован и экспериментально открыт эффект электромиграции адсорбированных атомов кремния, который вызывает перераспределение элементарных атомных ступеней на поверхности кремния. Впервые установлено влияние поверхностных фазовых переходов на кластерирование

моноатомных ступеней на поверхности кремния, установлена структура высоко-температурной поверхности кремния, обнаружено аномальное движение ступеней при сверхструктурном переходе. Полученные результаты использованы для разработки и совершенствования технологии молекулярно-лучевой эпитаксии и дают пути создания новых приборов полупроводниковой наноэлектроники на основе обнаруженных эффектов самоорганизации на поверхности кремния. Проводятся многочисленные исследования по диагностике полупроводниковых материалов и приборов микро- и наноэлектроники методами высокоразрешающей, сканирующей, отражательной электронной микроскопии, а также сканирующей зондовой микроскопии на основе атомно-силового микроскопа. Разработана и успешно применена технология электронной литографии остросфокусированным пучком электронов на основе растрового электронного микроскопа. Это позволило создавать нанообъекты для реализации квантовых эффектов. Развита методика диагностики и нанолитографии на основе атомно-силового микроскопа. Результаты работ лежат в основе нанотехнологий на этапе использования покрытий атомной толщины и кластеров атомного размера.



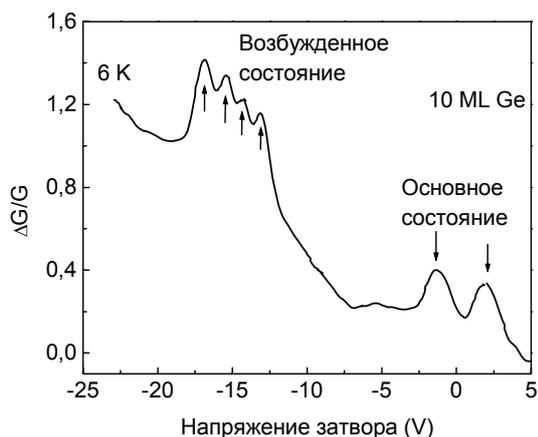
АСМ-изображение поверхности кремния (111), содержащей моноатомные ступени и двумерные островки кремния высотой 0,31 нм

Под руководством проф. А. В. Двуреченского проводятся исследования полупроводниковых наноструктур с квантовыми точками. Квантовыми точками называют

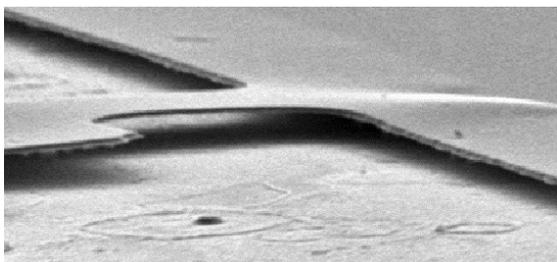
кристаллы нанометровых размеров какого-либо материала, встроенные в матрицу другого материала. Вследствие различий свойств материалов на границе раздела возникает разрыв энергетических зон, по которым происходит перенос носителей заряда. В результате для определенных комбинаций материалов во встроенном нанокристалле возможно образование потенциальной ямы для находящихся в нем носителей заряда. Если длина волны де-Бройля электронов в такой яме сравнима с размером нанокристалла, то энергетический спектр в яме становится дискретным и встроенный нанокристалл начинает обладать свойствами искусственного атома с присущим ему дискретным спектром. Энергетический спектр такого нанокристалла зависит от его размера (ширина квантовой ямы), и это обстоятельство является ключевым в перспективах направления, называемого наноструктурой с квантовыми точками. Управляя размером нанокристаллов, можно легко менять область длин волн в излучении или поглощении, обеспечивая достаточно широкий выбор возможных значений.

Здесь следует отметить, что энергия носителей заряда в полупроводниках меньше, чем в металлах, поэтому квантование энергетического спектра проявляется в полупроводниках для нанокристаллов больших размеров, по сравнению с металлами. Для металлов фактически соответствующий размер сравним с размером атома. Именно поэтому понятие «квантовые точки» используется преимущественно для полупроводниковых систем.

Помимо явления разменного квантования энергетического спектра, переход к нанокристаллам приводит к квантованию заряда. С уменьшением размера нанокристалла уменьшается его емкость, что приводит к росту энергии зарядки. В результате становится возможным фиксирование поштучного сообщения единичного заряда встроенному нанокластеру, что является основой направления, получившего название «одноэлектронные эффекты». В этом случае нет больших различий между металлическими и полупроводниковыми нанокристаллами. Приведенный ниже рисунок зависимости изменения проводимости от степени заполнения квантовых точек Ge в Si демонстрирует как проявления эффекта размерного квантования, так и одноэлектронные явления.



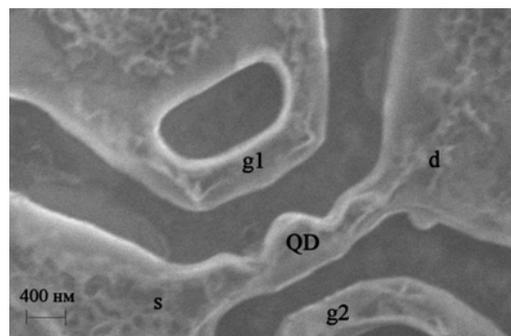
В группе «Электронного транспорта в системах пониженной размерности» исследуется одноэлектронный транзистор, работающий на эффекте кулоновской блокады. Такой прибор состоит из квантовой точки (QD), окруженной истоком (s), стоком (d), двумя затворами (g1 и g2), и позволяет управлять электронами, туннелирующими из истока в сток через квантовую точку, изменяя число электронов в точке (с помощью затворов) на единицы. При этом блокада туннелирования определяется кулоновским отталкиванием туннелирующего электрона от электронов, уже находящихся в точке, и характеризуется зарядовой энергией $E_c = e^2/C$, где C — электрическая емкость квантовой точки.



Проводящая полупроводниковая мембрана толщиной 110 нм, оторванная от подложки – квантовый фоновый волновод (именно на подобной структуре в 2000 г. был обнаружен квант теплопроводности)

Важное отличие исследуемого транзистора от аналогичных состоит в том, что он оторван от подложки (подвешен). Поскольку подложка обладает высокой диэлектрической проницаемостью, такой отрыв приводит к резкому (более чем на порядок)

уменьшению емкости C квантовой точки, а значит, к увеличению энергии зарядки E_c .



Одноэлектронный транзистор, созданный на основе подвешенной полупроводниковой мембраны

Этот параметр определяет критическую температуру работы транзистора $T_c = E_c/k_B$, которая, таким образом, резко возрастает.

Список литературы

1. *Surface passivation and morphology of GaAs(100) treated in HCL-isopropyl alcohol solution* / V. L. Alperovich, O. E. Tereshenko, N. S. Rudaya, D. V. Sheglov, A. V. Latyshev, A. S. Terekhov // *Appl. Surf. Sci.* 2004. Vol. 235, № 249.
2. *Терещенко О. Е. и др.* Уменьшение энергии связи атомов мышьяка на поверхности GaAs (100)–(2×4)/c(2×8) под влиянием адсорбированного цезия / О. Е. Терещенко, В. Л. Альперович, А. С. Терехов // *Письма ЖЭТФ.* 2004. Т. 79, № 163.
3. *Cesium-induced surface conversion: From As-rich to Ga-rich GaAs(001) at reduced temperatures* / O. E. Tereshenko, V. L. Alperovich, A. G. Zhuravlev, A. S. Terekhov, D. Paget // *Phys. Rev. B.* 2005. Vol. 71, № 155315(7).
4. *Polarized cathodoluminescence induced by low energy spin-polarized electrons injected in p-GaAs(Cs,O)* / V. L. Alperovich, A. S. Terekhov, A. S. Jaroshevich, G. Lampel, Y. Lassailly, J. Peretti, N. Rougemaille, T. Wirth // *Nuclear Instrum. and Methods A.* 2005. Vol. 536, № 302.
5. *Преломление термализованных электронов, баллистически эмитированных в вакуум из p+-GaAs-(Cs, O)* / В. В. Бакин, А. А. Пахневич, С. Н. Косолобов, Г. Э. Шайблер, А. С. Ярошевич, А. С. Терехов // *Письма в ЖЭТФ.* 2003. Т. 77, № 197.