

Учебно-методическая статья

УДК 538.9

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

Кафедра физики полупроводников физического факультета Новосибирского государственного университета

Виталий Львович Альперович¹

Зе Дон Квон²

Александр Васильевич Латышев³

¹⁻³ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹⁻³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ alper@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0069-1983>

² kvon@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7873-0757>

³ latyshev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4016-593X>

Аннотация

Кафедра физики полупроводников физического факультета НГУ готовит специалистов для научно-исследовательской работы в области физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики низкоразмерных систем и наноструктур. Кафедра дает знания, обеспечивающие возможность ее выпускникам участвовать в развитии полупроводниковых технологий, совершенствовании существующих и создании новых приборов оптоэлектроники, микро- и наноэлектроники. В статье изложена история создания кафедры, прослежены основные этапы формирования учебных курсов и работы по организации научно-исследовательской практики студентов в лабораториях Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова (ИФП СО РАН) – базового Института кафедры. Дан обзор преподаваемых на кафедре учебных курсов для подготовки бакалавров и магистров. Рассказано о научных и технологических достижениях ИФП СО РАН, об имеющемся в лабораториях Института уникальном измерительном, аналитическом и технологическом оборудовании, что служит основой для организации научно-исследовательской работы студентов на высоком научно-методическом уровне.

Ключевые слова

физика полупроводников, физика конденсированного состояния, теория твердого тела, физика поверхности, низкоразмерные системы, гетероструктуры, электронный транспорт, атомная структура, гетерозепитаксия, оптические явления, радиационная физика, нанодиагностика, квантовые технологии

Для цитирования

Альперович В. Л., Квон З. Д., Латышев А. В. Кафедра физики полупроводников физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 104–117. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

© Альперович В. Л., Квон З. Д., Латышев А. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 104–117
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 104–117

Department of Semiconductor Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University

Vitaly L. Alperovich¹, Ze Don Kvon²
Alexander V. Latyshev³

¹⁻³ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁻³ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ alper@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0069-1983>

² kvon@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7873-0757>

³ latyshev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4016-593X>

Abstract

The Department of Semiconductor Physics at the Faculty of Physics, Novosibirsk State University, trains specialists for research work in the field of condensed matter physics, semiconductor physics and the physics of low-dimensional systems and nanostructures. It also provides knowledge enabling its graduates to participate in developing semiconductor technologies, improving existing and creating new opto-, micro- and nanoelectronic devices. The article describes the history of the creation of the department, the main stages of the formation of training courses and work on the organization of students' research practice in the laboratories of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (ISP), which is the basic Institute for the department. An overview of the training courses taught at the department for the preparation of bachelors and masters is given. It is told about the scientific and technological achievements of ISP, and about unique measuring, analytical and technological equipment available in the laboratories of the Institute, which is the basis for organizing research work of students at a high scientific and methodological level.

Keywords

semiconductor physics, condensed matter physics, solid state theory, surface physics, low-dimensional systems, heterostructures, electronic transport, atomic structure, heteroepitaxy, optical phenomena, radiation physics, nanodiagnostics, quantum technologies

For citation

Alperovich V. L., Kvon Z. D., Latyshev A. V. Department of Semiconductor Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 104–117. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

Введение

Научно-техническая революция в конце XX в., ознаменовавшая начало эпохи тотальной коммуникации, связана в первую очередь с полупроводниками, так как они являются ее технологическим фундаментом. Более того, именно один из полупроводников, кремний (Si), является в XXI в. материалом номер один, потому что элементная база всей современной электроники, начиная с суперкомпьютеров и заканчивая мобильными устройствами в руках каждой домохозяйки, представляет собой сверхбольшие интегральные схемы, ключевым и основным элементом которых являются кремниевые полевые транзисторы нанометровых размеров. К сказанному можно добавить, что произошедшая на наших глазах революция в производстве осветительных устройств, когда на смену лампам накаливания и газоразрядным светильникам пришли светодиодные источники освещения, также вызвана достижениями в физике и технологии полупроводников.

С другой стороны, многие выдающиеся открытия в физике последних десятилетий были сделаны именно в полупроводниковых системах. Достаточно вспомнить целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, глубина и общезначимое значение которых такова, что они демонстрируют абсолютно уникальное событие в истории Нобелевских премий: две Нобелевские премии были присуждены за эффекты, иллюстрирующиеся одной экспериментальной зависимостью. Также нельзя не вспомнить всем известный графен, который пред-

ставляет собой первый двумерный полупроводник, и так называемые топологические изоляторы, являющиеся, с одной стороны, новыми разновидностями полупроводников, а с другой – реализацией новых квантовых состояний вещества.

Сказанного выше более чем достаточно, чтобы прийти к выводу о том, что современная физика полупроводников оказалась в начале XXI в. самой актуальной физической дисциплиной с точки зрения как прикладной, так и фундаментальной физики.

История создания кафедры

Кафедра физики полупроводников была основана в 1963 г. академиком Анатолием Васильевичем Ржановым, который руководил ею более 25 лет. Основные спецкурсы читали А. В. Ржанов, А. Ф. Кравченко, А. В. Чаплик, С. В. Богданов и Ф. Л. Эдельман. В 1972 г. учебный план кафедры существенно перерабатывается; студентам предлагаются новые спецкурсы: «Оптические явления в полупроводниках» (К. К. Свиташев), «Акустика кристаллов» (И. Б. Яковкин), «Электрон-фононные взаимодействия в полупроводниках» (С. В. Богданов), «Микроэлектроника» (С. П. Сеница), «Неустойчивости тока в полупроводниках» (П. А. Бородавский). В начале восьмидесятых добавились курсы «Электронные свойства неупорядоченных полупроводников» (Э. М. Баскин) и «Радиационная физика полупроводников» (Н. Н. Герасименко).

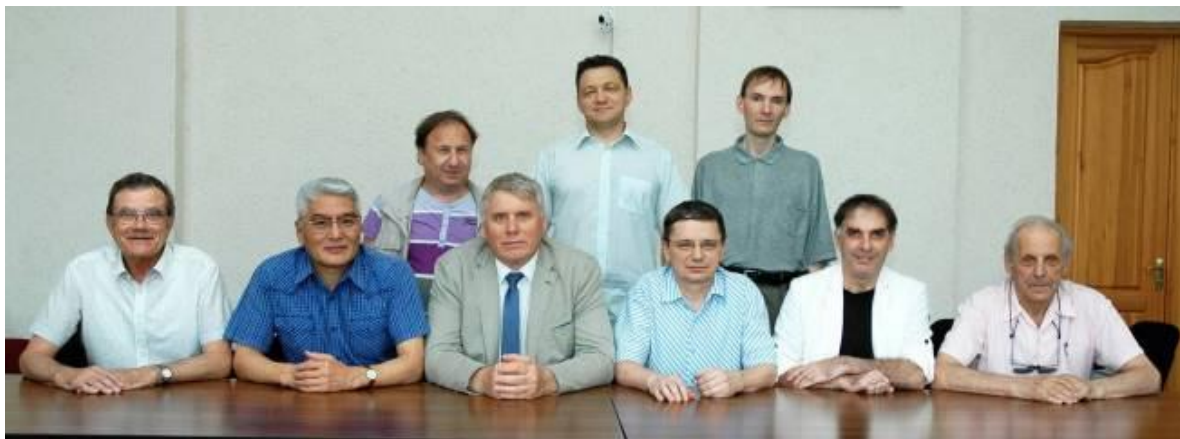
С 1990 по 2010 г. кафедрой руководил Заслуженный деятель науки РФ д-р физ.-мат. наук, проф. Александр Сергеевич Терехов. В этот период была проведена кардинальная перестройка учебного плана. Теперь он включал общие спецкурсы: «Введение в специальность» (А. С. Терехов), «Кристаллофизика полупроводников» (С. И. Чикичев), «Теория твердого тела» (А. В. Чаплик), «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем» (Д. З. Квон). По всем общим спецкурсам были введены семинарские занятия. В учебный план были также добавлены спецкурсы более узкого профиля: «Радиационная физика полупроводников» (А. В. Двуреченский), «Физическая акустика твердого тела» (Д. В. Петров), «Электронные свойства полупроводников с примесями и дефектами» (Э. М. Баскин).

Переход НГУ на двухуровневую систему образования в 1994 г. вносит дополнительные изменения в учебный план. Были введены новые спецкурсы для магистрантов: «Оптические процессы в полупроводниках» (В. Л. Альперович), «Физические основы нанотехнологии» (А. В. Двуреченский), «Гетерозипитаксия» (А. В. Латышев), «Квантовый транспорт в низкоразмерных структурах» (А. Г. Погосов), «Нанодиагностика» (А. В. Латышев).

С 2010 г. кафедра физики полупроводников, уже под руководством академика А. В. Латышева, продолжает работу на основе тех же принципов, которые заложил академик А. В. Ржанов и творчески развил профессор А. С. Терехов. В 2016 г. в учебном плане появились еще два новых спецкурса, направленных на углубленное изучение основ физики и технологии современных полупроводниковых приборов: «Полупроводниковая электроника» (Д. Р. Исламов) и «Полупроводниковая оптоэлектроника» (Г. Э. Шайблер). В настоящее время на кафедре работают А. В. Чаплик, А. В. Двуреченский, З. Д. Квон, В. Л. Альперович, А. Г. Погосов, О. Е. Терещенко, Л. С. Брагинский, А. В. Ненашев, Д. Р. Исламов, Г. Э. Шайблер, Е. Е. Родякина, Д. М. Казанцев и А. С. Петров. Сайт кафедры: <http://www.phys.nsu.ru/department/index.php/chairs/fpp>

Специализация и учебные курсы кафедры

На кафедре осуществляется обучение студентов по направлению подготовки: «510104 – Физика полупроводников. Микроэлектроника», а базовым институтом является Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.



Кафедра физики полупроводников в 2014 году.

Сидят: проф. А. В. Двуреченский, проф. З. Д. Квон, проф. А. В. Латышев, проф. В. Л. Альперович, проф. А. Г. Погосов, проф. А. В. Чаплик. Стоят: доцент Л. С. Брагинский, проф. О. Е. Терещенко, доцент А. В. Ненашев

Department of Semiconductor Physics in 2014.

Sitting: Professors A. V. Dvurechenskii, Z. D. Kvon, A. V. Latyshev, V. L. Alperovich, A. G. Pogosov, A. V. Chaplik. Standing: Assistant Professor L. S. Braginsky, Professor O. E. Tereshchenko, Assistant Professor A. V. Nenashev

Программы обучения на кафедре предусматривают получение студентами базовых знаний по физике конденсированного состояния, физики полупроводников и диэлектриков, а также необходимых умений и навыков научно-исследовательской работы с использованием современных полупроводниковых технологий. Обучение начинается в 5-м семестре с годового курса «Введение в физику полупроводников», который преподают профессор В. Л. Альперович и доцент А. В. Ненашев. Цель курса – познакомить студентов с основными идеями, методами и явлениями физики кристаллических твердых тел: металлов, диэлектриков и полупроводников и тем самым подготовить к углубленному изучению отдельных разделов физики полупроводников при дальнейшем обучении на кафедре. Изложение основ физики твердого тела невозможно без использования идей и принципов квантовой механики и статистической физики. Поскольку систематическое изучение этих дисциплин начинается только на 3-м курсе, необходимые для изучения зонной теории твердых тел сведения по квантовой механике и статистической физике излагаются на качественном уровне, без привлечения сложного математического аппарата. Большое внимание уделено центральным идеям физики кристаллических твердых тел: о симметрии кристаллов и квазичастицах. В рамках этого курса, наряду с лекциями и семинарами, в 5-м семестре организуются ознакомительные экскурсии в лаборатории института, которые проводят ведущие научные сотрудники вместе с преподавателями. Это помогает студентам выбрать задачи и руководителей для выполнения научной работы в лабораториях института.

В течение 6-го и 7-го семестров профессор О. Е. Терещенко преподает годовой курс «Кристаллофизика полупроводников», который посвящен изучению атомной и электронной структуры кристаллов, основ их физико-химических свойств, а также знакомству с современными методами исследования структуры и электронных свойств твердых тел. В программу курса включены основные вопросы кристаллофизики и кристаллохимии полупроводников: строение атомов и молекул; механизм образования и типы химических связей; теория кристаллических решеток и методы их классификации; теория обратной решетки; зонная структура кристаллов; рост объемных кристаллов и тонких пленок; методы экспериментального определения кристаллических структур с помощью дифракции рентгеновских

лучей и электронов; атомная структура и электронные свойства поверхности полупроводников.

На 4-м курсе преподаются еще два годовых курса. Профессор З. Д. Квон читает курс «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем». Первая часть этого курса посвящена изложению сначала физики приповерхностных слоев пространственного заряда в полупроводниках, а затем структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) и приборов на их основе, прежде всего прибора зарядового сдвига и МДП-транзистора. В МДП-транзисторе в 1966 г. была впервые реализована двумерная электронная система, т. е. он сыграл уникальную роль не только в развитии полупроводниковой индустрии, но и в рождении нового фундаментального направления физики конденсированного состояния – физики низкоразмерных электронных систем. Все открытия физики полупроводников последних 50 лет связаны с рождением и развитием этого направления. Квантовый эффект Холла, дробный квантовый эффект Холла, гетероструктуры – вот неполный список этих открытий, удостоенных Нобелевской премии по физике. Основные идеи и понятия физики низкоразмерных электронных систем являются предметом второй части курса. Здесь рассматриваются энергетический спектр и плотность состояний двумерных, одномерных (квантовые проволоки) и нульмерных (квантовые точки) систем; квантовые макроскопические явления (эффект Аронова – Бома, квантовый эффект Холла); графен, топологические изоляторы, двумерные полуметаллы.

Академик А. В. Чаплик и доцент Л. С. Брагинский преподают годовой курс «Теория твердого тела», который является базовым для понимания электронных свойств металлов, диэлектриков и полупроводников, а также функционирования приборов на их основе. В первой части курса изучаются динамика решетки (фононный спектр кристалла, теплоемкость, роль ангармонизма); электронные спектры (зонная теория) твердых тел (теорема Блоха, квазиимпульс, приближения слабой и сильной связи, эффективная масса, k-p-метод, локализованные состояния электронов в кристаллах) и явления, обусловленные электрон-электронным взаимодействием (статическое и динамическое экранирование, плазменные колебания и затухание Ландау, диэлектрическая проницаемость, переход Мотта, вигнеровская кристаллизация). Во второй части изучается теория кинетических явлений в твердых телах (кинетическое уравнение Больцмана, время релаксации импульса, электро- и теплопроводность, термоэлектрические эффекты, рассеяние электронов на примесях и фононах, электрон-электронное рассеяние, фононная теплопроводность, а также кинетические явления в магнитном поле: эффект Холла, магнетосопротивление, квантовые гальваномагнитные эффекты). Далее рассматриваются оптические явления в твердых телах (решеточное поглощение и комбинационное рассеяние света, поляритоны, поглощение свободными носителями заряда, межзонное поглощение, экситоны, переходы примесь – зона).

В магистратуре, с 1-го по 3-й семестр, на кафедре преподаются восемь полугодичных спецкурсов. Курс «Оптические процессы в полупроводниках» (профессор В. Л. Альперович) посвящен основам физики взаимодействия электромагнитного излучения с твердыми телами, знакомству с оптическими методами исследования полупроводников, а также с принципами работы полупроводниковых фотоприемников и светоизлучающих приборов. Вначале обсуждается соотношение между феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию оптических свойств вещества; далее изучаются микроскопические механизмы поглощения света в полупроводниках (межзонные оптические переходы, экситонные эффекты, поглощение света на колебаниях решетки и на свободных носителях заряда, оптические переходы с участием примесных уровней); процессы с участием неравновесных носителей заряда (внутренний и внешний фотоэффект, излучательная рекомбинация электронов и дырок); оптические явления в полупроводниковых микроструктурах – квантовых ямах и сверхрешетках. Наряду с традиционными фотоэффектами, рассмотрены оптическая ориентация спинов и выстраивание импульсов электронов, горячая поляризованная фотолюминесценция, фототоки на баллистических и горячих электронах, а также основанные на этих явлениях спек-

троскопические методы исследования энергетического спектра и механизмов рассеяния импульса, энергии и спина электронов.

Член-корреспондент РАН, профессор А. В. Двуреченский преподает курсы «Радиационная физика полупроводников» и «Физические основы нанотехнологии». Цель курса «Радиационная физика полупроводников» – дать базовые знания по основным понятиям, законам и теории микроскопического описания механизмов потерь энергии быстрых частиц при движении в твердом теле. Зачем нужен этот курс: 1) в современном аналитическом оборудовании электронные, ионные, рентгеновские (синхротронные) и лазерные пучки широко используются для исследования структуры и состава материала; 2) тот же набор радиационных воздействий применяется для управления функциональными характеристиками материалов и приборов на их основе.

Задача курса «Физические основы нанотехнологии» – дать базовые знания по основным разделам нанотехнологии полупроводников: методам и подходам, обеспечивающим создание структур, содержащих элементы размерами нанометрового диапазона (1–100 нм), приводящими к принципиально новым свойствам и характеристикам; методам формирования наноструктур на поверхности полупроводниковых кристаллов в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии и эпитаксии из металлоорганических соединений; нанесению металлических и диэлектрических пленок при физическом, химическом и плазменном осаждении материалов, оптической, электронной, рентгеновской и ионной литографии, плазменном и ионном анизотропном селективном травлении.

Академик А. В. Латышев преподает курсы «Гетероэпитаксия» и «Нанодиагностика». Цель курса «Гетероэпитаксия» – дать магистрантам базовые знания по некоторым разделам физики кристаллизации, физики твердого тела и физики полупроводников для понимания структурных процессов, протекающих на поверхности кристалла при сублимации, эпитаксиальном росте, термическом отжиге и фазовых переходах, необходимые для осуществления фундаментальных и прикладных исследований в области физики конденсированных сред и физического материаловедения, физики и технологии твердотельных низкоразмерных систем. В курсе рассматриваются термодинамика поверхности однокомпонентных и многокомпонентных кристаллов, равновесная форма кристалла (теорема Вульфа, поверхностное натяжение, фазовый переход порядок – беспорядок, структура атомных ступеней), поверхностная диффузия, механизмы и кинетика роста кристаллов, термодинамические и кинетические аспекты нестабильности поверхностной морфологии (эшелонирование ступеней, взаимодействие с дефектами и дислокациями, эффект Швёбеля).

Курс «Нанодиагностика» направлен на формирование у студентов базовых знаний о современных методах диагностики и развитие навыков проведения самостоятельных исследований структуры, химического состава, оптических и электрофизических свойств поверхности твердого тела, микро- и наносистем. В курсе рассматриваются методы измерений состава, структуры и геометрических размеров наноматериалов и наноструктур; разработка стандартных образцов и методик измерений для обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне; взаимодействие электронного пучка с полупроводником (упругое и неупругое рассеяние, дифракция быстрых и медленных электронов); методы сканирующей электронной микроскопии и ионной микроскопии, просвечивающей и отражательной электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии (туннельная и атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия ближнего поля); оптические методы: эллипсометрия, инфракрасная спектроскопия, Фурье-спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света; методы электронной спектроскопии: Оже-спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; рентгеновские дифракционные методы.

Курс «Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах» преподает профессор А. Г. Погосов. Цель спецкурса – обучение студентов основам современных теорий, описывающих квантовый электронный транспорт в низкоразмерных полупроводниковых системах, знакомство с кинетическими явлениями, обусловленными интерференцией

электронных волн, корреляционными эффектами, с методами и подходами, используемыми для их описания. Спецкурс состоит из семи разделов, в которых отражены различные типы квантового электронного транспорта в полупроводниковых структурах пониженной размерности. Основная идея курса – изучение кинетических явлений и эффектов, выходящих за рамки квазиклассического подхода и одноэлектронной зонной теории. Существенное внимание уделено квантовым кинетическим явлениям в полупроводниковых структурах малых размеров – наноструктурах. Эти явления относятся к числу наиболее ярких и интенсивно исследуемых транспортных свойств систем пониженной размерности. Спецкурс включает знакомство с технологией изготовления наноструктур и техникой низкотемпературного эксперимента; квантовые интерференционные явления в неупорядоченных проводниках; баллистический транспорт в низкоразмерных системах; транспорт в сильном магнитном поле (краевые токовые состояния и квантовый эффект Холла); одноэлектронный транспорт (квантовые точки и туннельные нанопереходы, кулоновская блокада, одноэлектронный транзистор); дробный квантовый эффект Холла.

Курс «Полупроводниковая электроника», который преподает доцент Д. Р. Исламов, посвящен технологии создания и физическим принципам работы полупроводниковых приборов. Программа курса включает основные физические явления, лежащие в основе работы полупроводниковых приборов; зонные диаграммы и вольт-амперные характеристики контакта металл-полупроводник и p-n-перехода; принципы работы диода и стабилитрона; гетеропереходы; принцип действия, характеристики и эквивалентные схемы полевых транзисторов на структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП); комплементарные МДП схемы; принцип работы биполярных транзисторов; другие приборы на основе p-n-переходов (тиристоры, симисторы, варикапы, r-i-n-диоды); технологию производства полупроводниковых интегральных схем; полупроводниковые датчики (магнитного поля, давления, температуры); флеш-память (принцип действия, ресурс, скорость чтения и записи); основы цифровой электроники (ключ, инвертор, базовые логические элементы, синхронные и асинхронные схемы, сдвиговый регистр). Особое внимание уделяется компоновке элементной базы в микросхемах для конструирования сложных аналоговых и цифровых схем, а также современным проблемам в развитии технологии интегральных схем (планарная технология, трехмерная технология, металлизация, low- κ диэлектрики).

Спецкурс «Полупроводниковая оптоэлектроника», который преподает доцент Г. Э. Шайблер, дает студентам базовые знания, умения и навыки по устройству, принципам работы, областям применения полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Спецкурс начинается с изучения основных излучающих полупроводниковых приборов – светодиодов и лазеров. Особое внимание уделяется технологии и параметрам современных белых светодиодов, основу которых составляет синий светодиод на гетеропереходе нитрида галлия GaN с твердым раствором InGaN. Далее рассматриваются полупроводниковые фотоприемники: фоторезисторы, фотодиоды, ПЗС-матрицы, КМОП-матрицы, а также солнечные элементы и полупроводниковые фотокатоды с отрицательным электронным средством. Дается обзор полупроводниковых приборов СВЧ и терагерцового диапазона, систем волоконно-оптической связи. Анализируются основные характеристики приборов, которые приводятся в технической документации («даташите»). Излагаются основы технологий, используемых при изготовлении приборов; рассматриваются основные электрические схемы подключения приборов.

В четвертом семестре магистратуры учебных курсов нет; он целиком посвящен научно-исследовательской работе в лабораториях института, подготовке и защите магистерской диссертации.

Научно-исследовательская работа студентов проводится на протяжении всего периода обучения. Два раза в семестр студенты готовят краткие письменные отчеты (с оценкой руководителя) и выступают на заседаниях кафедры с устным отчетом о ходе и результатах научной практики в лабораториях. Наличие публикации по результатам научно-исследователь-

ской работы является необходимым условием успешной защиты магистерской диссертации и получения рекомендации в аспирантуру.

Научно-исследовательская работа в ИФП СО РАН

Научно-исследовательская работа студентов проводится в базовом институте кафедры – Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН, <http://www.isp.nsc.ru>). ИФП СО РАН, созданный в 1964 г., в настоящее время состоялся как признанный исследовательский центр, интегрированный в международное научное сообщество, который совмещает достижения в области фундаментальных исследований с практической реализацией высокотехнологических инновационных разработок, необходимых современной экономике и подготовкой высококвалифицированных научных сотрудников и инженерно-технических специалистов.

ИФП СО РАН принадлежит ведущая роль в реализации целого ряда больших академических и промышленно-ориентированных проектов. Институт имеет немало высококвалифицированных специалистов с многолетним опытом выполнения крупных научно-исследовательских программ. Он также обладает целым набором самого современного научного, технологического и диагностического оборудования. В ИФП СО РАН накоплен огромный опыт по подготовке кадров высшей квалификации, начиная с аспирантуры. Он выпустил в свет сотни кандидатов и десятки докторов наук. Институт тесно связан с ведущими предприятиями высокотехнологической промышленности как в Сибирском регионе, так и во всей России, с федеральными министерствами и ведомствами.

Институт занимает ведущие позиции в области физики полупроводников, физики конденсированного состояния, физики и технологии низкоразмерных систем, опто-, нано- и акустоэлектроники, сенсорики, однофотоники и одноэлектроники, квантовой электроники, спинтроники. Основные фундаментальные достижения Института связаны с исследованием атомных процессов и электронных явлений на поверхности полупроводников и границах раздела полупроводниковых структур, квантовых эффектов в структурах пониженной размерности, в том числе в сверхрешетках и гетероструктурах с квантовыми ямами [1; 2]. Важными представляются работы Института по разработке элементной базы перспективной электронной техники и нового поколения устройств нано- и оптоэлектроники, основанных на использовании низкоразмерных структур, в которых происходит переход к нанометровым масштабам, и, как следствие, определяющую роль начинает играть квантово-механическая природа квазичастиц в твердом теле.



Научная работа студентов кафедры физики полупроводников
Research work of students at the Department of Semiconductor Physics

Одним из основных достижений Института в указанном направлении является разработка технологии выращивания эпитаксиальных полупроводниковых структур с двумерным электронным газом. Такие структуры представляют собой потенциальную яму на основе многослойной эпитаксиальной пленки из атомно-чистых материалов с практически идеальными структурными границами и удаленным легированием, чтобы исключить рассеяние на примесях. На основе гетероструктур AlGaAs/GaAs изготовлены затворно-управляемые квантовые интерферометры, имеющие электронное кольцо с рекордно малым эффективным радиусом 90–130 нм. Отметим, что в России описанные технологии имеются только в ИФП СО РАН.

Суперкомпьютерное моделирование наносистем на основе двумерного электронного газа позволило предсказать целый ряд особенностей электронного транспорта, которые определяются законами квантовой механики, установить топологию удерживающего электроны потенциала, геометрию электронных систем, а также характер квантовых и одноэлектронных явлений, происходящие внутри наноустройств.

ИФП СО РАН входит в число лидеров по разработке технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – одной из основных технологий современной физики полупроводников и полупроводниковой электроники, представляющей собой процесс послойного, контролируемого эпитаксиального роста различных соединений на уровне одного атомного монослоя. Технология МЛЭ позволяет создавать атомарно резкие границы раздела, недоступные в других технологиях. Использование в технологии МЛЭ атомарно-чистых исходных материалов в условиях сверхвысокого вакуума (лучшего, чем в окружающем нас космосе), дает возможность создания материалов и структур с принципиально новыми свойствами [3].

Предельным случаем систем с пониженной размерностью являются нульмерные системы, состоящие из массива атомных кластеров или островков нанометровых размеров в полупроводниковой матрице. Дискретный спектр энергетических состояний в таких кластерах подобен энергетическому спектру отдельных атомов, что позволяет говорить об «искусственных атомах». Такие кластеры получили название «квантовых точек». Предсказываемое теоретически и наблюдаемое экспериментально квантование энергетического спектра носителей заряда (дырок) в квантовых точках германия формирует особенности в транспорте носителей заряда и фотопроводимости [4].

В Институте созданы экспериментальные образцы лазеров с вертикальным резонатором, которые отличаются от обычных полосковых полупроводниковых лазеров расположением брэгговских зеркал резонатора параллельно плоскости полупроводниковой пластины. Лазерная структура содержит более тысячи слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и обеспечивает высокую добротность микрорезонатора. Полученные таким образом излучатели одиночных фотонов с токовой накачкой на основе микрорезонаторных структур с InAs квантовыми точками малой плотности могут быть использованы при создании систем квантовых вычислений, квантовой криптографии и миниатюрных атомных стандартов частоты нового поколения.

Одним из самых заметных достижений ИФП СО РАН является разработка технологии МЛЭ высококачественных структур с HgTe квантовыми ямами. Следует отметить, что подобная технология существует в мире еще только в одном месте – в Вюрцбургском университете (Германия). Замечательным свойством HgTe квантовых ям является тот факт, что в формировании их энергетического спектра ключевая роль принадлежит релятивистским эффектам. Благодаря этим эффектам, в зависимости от толщины указанных ям в них можно реализовать целый набор уникальных квантовых систем. При определенной толщине квантовой ямы ширина запрещенной зоны становится равной нулю, а электроны и дырки становятся безмассовыми дираковскими фермионами. Квантовые ямы с инвертированной зонной структурой являются двумерными топологическими изоляторами. В квантовой яме, изготовленной на основе теллурида ртути, обнаружена новая низкоразмерная система – двумерный полуметалл, состоящий из легких электронов и более тяжелых дырок. В отличие от традиционных трехмерных полуметаллов, таких как висмут, сурьма или графит, в двумерном полу-

металле простым изменением затворного напряжения можно получить любое соотношение между концентрацией двумерных электронов и дырок. В указанной системе предсказан и наблюдается целый ряд новых явлений, вызванных взаимодействием электронов и дырок [5]. Также следует отметить, что на основе МЛЭ технологии HgTe в ИФП СО РАН получены трехмерные топологические изоляторы, обладающие рекордно высокими подвижностями поверхностных дираковских фермионов. Именно благодаря этому достижению впервые был проведен эксперимент по прямому наблюдению жесткой связи импульса и спина – наиболее фундаментальному свойству всех трехмерных топологических изоляторов [6]. В Институте также исследуются трехмерные топологические изоляторы на основе полупроводниковых соединений A_3B_6 (Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 и др.), в которых обнаружены токи двумерных дираковских фермионов, управляемые светом [7].

В течение последних десятилетий усилия физиков и технологов были также направлены на разработку методов и подходов, позволяющих запининговать вихри сверхпроводящего материала и, таким образом, получить материал, способный оставаться сверхпроводящим в сильных магнитных полях. В ИФП СО РАН предложен способ локализации вихрей в наносистемах и перехода в бездиссипативное состояние в относительно высоких магнитных полях [8].

Среди наиболее выдающихся достижений за последние годы в области опто- и фотоэлектроники можно выделить разработку технологии получения полупроводниковых слоев на основе соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ), которое является основным материалом современной микрофотоэлектроники [9]. При создании варизонных структур на основе КРТ были разработаны физические основы детекторной структуры для фотоприемных устройств нового поколения. Линейчатые и матричные фотоприемники на основе ГЭС КРТ МЛЭ предназначены для оснащения инфракрасных тепловизионных систем, применяемых в военной области, медицине, электроэнергетики, наземном, воздушном и водном транспорте, металлургическом и нефтехимическом производствах и строительстве.

Разработанные в Институте уникальные полупроводниковые эмиттеры холодных фотоэлектронов были успешно использованы в международном научном эксперименте, «моделирующим» атомные процессы в ранней Вселенной. Этот эксперимент проводился в Институте ядерной физики (Гейдельберг, Германия) [10].

Следует особо отметить, что фундаментальные свойства наносистем зависят не только от квантовых размерных эффектов, но также от тонкой микроскопической структуры материалов, используемых в технологическом процессе. Поэтому для разработки действующих макетов квантовых электронных приборов и устройств в Институте организован полный замкнутый цикл «изготовление – характеристика», позволяющий оперативно находить оптимальные технологические решения для создания приборов нового поколения. Разрабатываемые подходы базируются на создании модельных квантовых систем с последующим экспериментальным исследованием, численным моделированием и теоретическим анализом оптических и электронных характеристик. Управление атомными и электронными процессами и поиск путей их реализации является главной проблемой на современном этапе развития твердотельных технологий. Ее решение открывает новые возможности конструирования методами зонной инженерии и инженерии волновых функций наноструктур их электронного спектра и свойств, определяемых квантово-механической природой элементарных возбуждений в твердом теле. Всё это и составляет одно из главных направлений института, связанное с квантовыми технологиями, развитие которых требует объединения усилий физиков и технологов, теоретиков и экспериментаторов, инженеров и специалистов по вычислительным системам.

Образовательные задачи

Основная задача кафедры физики полупроводников – подготовка специалистов высшей категории для проведения научных исследований на мировом уровне с применением совре-

менных методов исследований в области физики конденсированного состояния, физики полупроводников и диэлектриков, физики твердого тела, физики низкоразмерных систем, опто- и наноэлектроники, микросенсорики, твердотельной нанофотоники, квантовой электроники и квантовых технологий.

Все выпускники кафедры получают знания и навыки по физико-химическим основам микро-, опто- и наноэлектроники, осваивают современные полупроводниковые технологии, включая технологии эпитаксиального роста тонких пленок, комплексной диагностики систем пониженной размерности, наноструктурирования и полупроводниковых нанотехнологий.

Система подготовки специалистов – трехуровневая: первая ступень – основное базовое четырехлетнее образование завершается защитой квалификационной работы бакалавра; вторая – двухгодичная магистратура, с защитой магистерской диссертации; третья – четырехгодичная аспирантура, с защитой выпускной квалификационной работы, которая может быть основой диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук по соответствующим специальностям.

Выпускники кафедры являются подготовленными научными исследователями, способными решать физическими методами современные научные задачи, имеющие навыки преподавать дисциплины физико-математического профиля в вузах и колледжах. Лучшие выпускники магистратуры проходят обучение в аспирантуре и могут защитить диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Подготовка специалистов на кафедре реализуется известными российскими научными школами, получившими мировое признание. Высокий уровень подготовки специалистов на кафедре физики полупроводников обеспечивается оптимальным выбором обновляемых спецкурсов, правильным сочетанием экспериментальных и теоретических методов с широким использованием компьютерной техники современного научного и технологического оборудования, учебной литературы.



Группа выпускников кафедры физики полупроводников после защиты дипломов
A group of graduates of the Department of Semiconductor Physics after defending their diplomas

В настоящее время студенты проводят исследования атомных процессов и электронных явлений на поверхности полупроводников и границах раздела полупроводниковых структур, квантовых эффектов в структурах пониженной размерности, в том числе в эпитаксиальных сверхрешетках и гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками, исследуют квантовые свойства гетероэпитаксиальных структур и их приложения для получения нового поколения нанoeлектроники и систем оптоэлектроники; создают и исследуют новые материалы для электроники, в том числе СВЧ-электроники, силовой электроники и сенсорики, изучают графен, слоистые полупроводники, сращенные структуры АЗВ5-кремний, тонкие слои кремния на изоляторе, кристаллы алмаза и алмазоподобные пленки; разрабатывают полупроводниковые наносистемы для нано- и биосенсоров; проводят исследования в области квантовой информатики и сенсорики. Наши студенты разрабатывают физико-химические основы для технологий получения новых материалов электроники будущего. В числе приоритетных направлений – развитие электронной компонентной базы на новых физических принципах и переход от двумерной к трехмерной схмотехнической архитектуре.

Студенты, специализирующиеся на кафедре физики полупроводников, в дополнение к имеющимся традиционным возможностям использования уникального аналитического и технологического оборудования в ИФП СО РАН, имеют возможность работать на современном экспериментальном оборудовании ведущих мировых производителей в центре коллективного пользования диагностическим оборудованием (ЦКП «Наноструктуры», <http://www.isp.nsc.ru/ckp>) при ИФП СО РАН для выполнения исследований в рамках дипломных и диссертационных работ.

Заключение

Таким образом, кафедра физики полупроводников физического факультета НГУ дает знания и навыки для научно-исследовательской работы в актуальных областях физики конденсированного состояния и полупроводниковых высоких технологий, направленных на совершенствование существующих и создание новых приборов опто-, микро- и нанoeлектроники. Научные и технологические достижения базового Института кафедры – ИФП СО РАН в области изучения квантовых свойств гетероэпитаксиальных структур, полупроводниковых технологий, квантовой оптики и квантовой информатики, устройств квантовой криптографии и квантовой сенсорики, имеющееся в лабораториях Института уникальное измерительное, аналитическое и технологическое оборудование служат основой для научно-исследовательской работы студентов. Всё это позволяет надеяться, что кафедра станет своего рода центром по созданию нового поколения квантовых конструкторов и технологов.

Список литературы

1. Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (1964–2014) / Отв. ред. А. В. Латышев, А. В. Двуреченский, А. Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. 844 с.
2. **Latyshev A. V., Dvurechenskii A. V., Aseev A. L.** Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications. Elsevier Inc, 2017. 527 p.
3. **Latyshev A. V., Fedina L. I., Rogilo D. I., Sitnikov S. V., Kosolobov S. S.** Atomically Controlled Silicon Surface. Novosibirsk, Parallel, 2016, 220 p.
4. **Pchelyakov O. P., Dvurechenskii A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L.** Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27.
5. **Gusev G. M., Olshanetsky E. B., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Portal J. C.** Quantum Hall Effect near the Charge Neutrality Point in a Two-Dimensional Electron-Hole System. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, pp. 166401–166404.

6. **Maier H., Ziegler J., Fischer R., Kozlov D., Kvon Z. D., Mikhailov N., Dvoretzky S. A., Weiss D.** Ballistic Geometric Resistance Resonances in a Single Surface of a Topological Insulator. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, 2023.
7. **Reimann J., Schlauderer S., Schmid C. P., Langer F., Baiertl S., Kokh K. A., Tereshchenko O. E., Kimura A., Lange C., Gdde J., Hfer U., Huber R.** Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band. *Nature*, 2018. vol. 562, pp. 396–400.
8. **Crdoba R., Baturina T. I., Ses J., Mironov A. Yu., Teresa J. M. de, Ibarra M. R., Nasimov D. A., Gutakovskii A. K., Latyshev A. V., Guillamn I., Suderow H., Viera S., Baklanov M. R., Palacios J. J., Vinokur V. M.** Magnetic field-induced dissipation-free state in superconducting nanostructures. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, 1437.
9. Фотоприемные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур / Отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 258 с.
10. **Novotný O., Wilhelm P., Paul D., Klosi ., Saurabh S., Becker A., Blaum K., George S., Gck J., Grieser M., Grussie F., R. von Hahn, Krantz C., Kreckel H., Meyer C., Mishra P. M., Muell D., Nuesslein F., Orlov D. A., Rimmler M., Schmidt V. C., Shornikov A., Terekhov A. S., Vogel S., Zajfman D., Wolf A.** Quantum-state-selective electron recombination studies suggest enhanced abundance of primordial HeH⁺. *Science*, 2019, vol. 365, no. 6454, pp. 676–679.

References

1. Anniversary collection of selected papers of the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (1964–2014). Eds. A. V. Latyshev, A. V. Dvurechenskii, A. L. Aseev. Novosibirsk, Parallel, 2014, 844 p. (in Russ.)
2. **Latyshev A. V., Dvurechenskii A. V., Aseev A. L.** Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications. Elsevier Inc, 2017. 527 p.
3. **Latyshev A. V., Fedina L. I., Rogilo D. I., Sitnikov S. V., Kosolobov S. S.** Atomically Controlled Silicon Surface. Novosibirsk, Parallel, 2016, 220 p.
4. **Pchelyakov O. P., Dvurechenskii A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L.** Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27.
5. **Gusev G. M., Olshanetsky E. B., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Portal J. C.** Quantum Hall Effect near the Charge Neutrality Point in a Two-Dimensional Electron-Hole System. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, pp. 166401–166404.
6. **Maier H., Ziegler J., Fischer R., Kozlov D., Kvon Z. D., Mikhailov N., Dvoretzky S. A., Weiss D.** Ballistic Geometric Resistance Resonances in a Single Surface of a Topological Insulator. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, 2023.
7. **Reimann J., Schlauderer S., Schmid C. P., Langer F., Baiertl S., Kokh K. A., Tereshchenko O. E., Kimura A., Lange C., Gdde J., Hfer U., Huber R.** Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band. *Nature*, 2018. vol. 562, pp. 396–400.
8. **Crdoba R., Baturina T. I., Ses J., Mironov A. Yu., Teresa J. M. de, Ibarra M. R., Nasimov D. A., Gutakovskii A. K., Latyshev A. V., Guillamn I., Suderow H., Viera S., Baklanov M. R., Palacios J. J., Vinokur V. M.** Magnetic field-induced dissipation-free state in superconducting nanostructures. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, 1437.
9. Photodetectors based on the cadmium-mercury-tellurium epitaxial system. Ed. Aseev A. L. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012, 258 p. (in Russ.)
10. **Novotný O., Wilhelm P., Paul D., Klosi ., Saurabh S., Becker A., Blaum K., George S., Gck J., Grieser M., Grussie F., R. von Hahn, Krantz C., Kreckel H., Meyer C., Mishra P. M., Muell D., Nuesslein F., Orlov D. A., Rimmler M., Schmidt V. C., Shornikov A.,**

Terekhov A. S., Vogel S., Zajfman D., Wolf A. Quantum-state-selective electron recombination studies suggest enhanced abundance of primordial HeH⁺. *Science*, 2019, vol. 365, no. 6454, pp. 676–679.

Информация об авторах

Виталий Львович Альперович, доктор физико-математических наук, профессор
Зе Дон Квон, доктор физико-математических наук, профессор
Александр Васильевич Латышев, доктор физико-математических наук, академик РАН

Information about the Authors

Vitaly L. Alperovich, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
Ze Don Kvon, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
Alexander V. Latyshev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Academician of Russian Academy of Sciences

*Статья поступила в редакцию 25.09.2021;
одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 01.12.2021
The article was submitted 25.09.2021;
approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 01.12.2021*