

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ШКОЛА ФИЗИКИ
И ТЕХНИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ
БГУ**

**КАФЕДРЕ
ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

50 ЛЕТ

МИНСК
БГУ
2016

УДК 537.311.33:378.4(476-25)096(091)
ББК 22.379р3(45си)г
Ш67

Редакционная коллегия:

В. Б. Оджаев (отв. ред.),
И. И. Азарко, Н. И. Горбачук, Н. М. Казючиц, В. К. Ксенович,
Н. М. Лапчук, Т. М. Лапчук, М. Г. Лукашевич, А. Н. Олешкевич,
Н. А. Поклонский, В. С. Просолович, А. Р. Челядинский, В. Ю. Явид

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор *В. А. Пилипенко*;
кандидат физико-математических наук, доцент *С. П. Сернов*

Школа физики и техники полупроводников БГУ. Кафедре
Ш67 физики полупроводников и наноэлектроники 50 лет / редкол.:
В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. — Минск : БГУ, 2016. — 167 с.
ISBN 978-985-566-367-7.

Представлены основные этапы создания, становления и развития школы физики и техники полупроводников Белорусского государственного университета, аспекты организации учебного процесса, результаты и направления научно-исследовательской работы кафедры и ее четырех научных лабораторий в области полупроводниковых материалов и приборных структур на их основе.

УДК 537.311.33:378.4(476-25)096(091)
ББК 22.379р3(45си)г

ISBN 978-985-566-367-7

© БГУ, 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание посвящено истории создания и развития кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета Белорусского государственного университета и приурочено к ее 50-летию юбилею. В нем представлен краткий обзор научных достижений сотрудников кафедры. Приводятся сведения о структуре многоуровневой подготовки специалистов высшей квалификации.

Кафедра, образованная в 1966 г. как кафедра физики полупроводников под руководством профессора Валентина Дмитриевича Ткачёва, в настоящее время — одна из самых больших специализирующих кафедр БГУ. В ее структуру входят четыре научно-исследовательские лаборатории (физики и техники полупроводников; спектроскопии полупроводников; физики электронных материалов; высокоэнергетичной ионной имплантации и функциональной диагностики).

Отличительной особенностью кафедры являются научные направления и прикладные разработки в области физики и техники полупроводников. Успехи, достигнутые сотрудниками кафедры в области физики низкоразмерных систем и нанoeлектроники, а также современные тенденции в развитии науки и техники привели к необходимости корректировки как направлений научных исследований и образовательного процесса, так и названия кафедры, и в 2002 г. она была переименована в кафедру физики полупроводников и нанoeлектроники.

За 50 лет на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники подготовлено более тысячи молодых и активных специалистов высокой и высшей квалификации для научно-исследовательских институтов, учебных заведений и промышленных предприятий. Выпускники кафедры успешно трудятся не только в вузах, научно-исследовательских институтах НАН Беларуси, на предприятиях

республики, но и в научных и учебных центрах Европы, Азии, Африки и Америки.

Интеллектуальный потенциал и опыт сотрудников кафедры позволяют готовить высококвалифицированных специалистов. Благодаря установившимся учебным и научным связям с университетами и научными институтами России, Украины, США, Франции, Великобритании, Чехии, Швеции, Польши, Австрии, Канады, Германии, Ирландии, Голландии, Португалии, Ирака, Дании, Вьетнама, Иордании, Монголии и др. имеются широкие возможности для проведения совместных исследований, стажировок, взаимного обмена студентами и сотрудниками.

Идею написания книги подсказало время. Во-первых, история кафедры небезразлична всем поколениям выпускников и сотрудников, которые работали или работают в настоящее время на ней. Во-вторых, в последние годы к истории становления отдельных научных направлений, к истокам и стратегии развития кафедры в целом стал проявляться интерес у молодежи – студентов, магистрантов и аспирантов. И, безусловно, дополнительным аргументом стала юбилейная дата. Анализ результатов работы кафедры за полувековой период позволяет понять, как события университетской жизни и жизни страны отразились на направлениях научных исследований и подготовке кадров. Предлагаемое издание позволяет проследить историю становления и развития в Белорусском государственном университете одного из постоянно востребованных научных направлений – физики и техники полупроводников и полупроводниковых приборов, научного приборостроения и нанотехнологий, программного обеспечения и автоматизации измерительных систем. За годы существования кафедры закончили аспирантуру и защитили кандидатские диссертации более 100 человек, а более 20 из них стали докторами наук. Сегодня на кафедре работают 6 докторов наук и 20 кандидатов наук.

В составлении книги принимал участие практически весь профессорско-преподавательский и научный состав кафедры. Надеемся, что она заинтересует широкий круг читателей – от ученых, специалистов в области физики низкоразмерных систем, микро-, опто- и нанoeлектроники до аспирантов, магистрантов, студентов и абитуриентов.

В. Б. Оджаяев

ВАЛЕНТИН ДМИТРИЕВИЧ ТКАЧЁВ — УЧЕНЫЙ И УЧИТЕЛЬ

В. Ю. Явиг

Кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета Белорусского государственного университета в октябре 2016 г. отмечает 50-летие со дня основания.

У истоков создания кафедры физики полупроводников физического факультета БГУ (так кафедра называлась с 1966 до 2002 г.) стоял ее первый заведующий, известный ученый и педагог, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки БССР Валентин Дмитриевич Ткачëв, который руководил кафедрой до 1976 г.



В. Д. Ткачëв

В. Д. Ткачëв родился 19 февраля 1939 г. в Минске в семье рабочих. Мать, Янковская Ольга Григорьевна, и отец, Ткачëв Дмитрий Макарович, работали на хлебозаводе. Великую Отечественную войну младший лейтенант Дмитрий Макарович встретил, находясь на военных сборах. Ольга Григорьевна и дети (Галя и Валик) пережили немецкую оккупацию в д. Пруссy Копыльского района, где Ольга Григорьевна была связной у партизан. В 1943 г. деревню сожгли немцы. По счастливой случайности мать

с детьми остались живы: они спрятались в соседней деревне. Поэтому можно сказать, что о войне Валентин Дмитриевич знает не только по рассказам. После войны семья Ткачёвых поселилась в Минске, мать и отец Валентина Дмитриевича снова стали работать на хлебозаводе.

В 1956 г. В. Д. Ткачёв с серебряной медалью окончил белорусскую школу № 44 г. Минска и поступил на отделение физики физико-математического факультета БГУ. В университете он с первых лет приобщился к научной работе и в лаборатории проводил больше времени, чем на лекциях. В 1957 г. В. Д. Ткачёв участвовал в олимпиаде по физике в Москве. В 1960/61 уч. г. был председателем научного сообщества студентов-физиков БГУ. Трудовую деятельность в качестве младшего научного сотрудника Института физики АН БССР начал в 1961 г. после окончания БГУ.

Конец 50-х – начало 60-х гг. XX в. были отмечены бурным развитием физики твердого тела и полупроводников. Это было связано с двумя приоритетными программами: подготовкой полета космического корабля «Аполлон» на Луну и разработкой ракеты «Минитмен» в США, а также с выполнением программы освоения космического пространства и созданием межконтинентальной ракеты в СССР. Обе программы были успешно реализованы во многом благодаря созданию на базе твердотельной электроники принципиально новых полупроводниковых приборов и систем управления. В этот период были разработаны и созданы интегральные схемы, светоизлучающие приборы – полупроводниковые лазеры и светодиоды, детекторы для обнаружения электромагнитного излучения и частиц проникающей радиации, а также планарная технология. Все это привело к рождению новой научной отрасли на границе физики полупроводников, электронной техники и суммы технологий, которая впоследствии получила названия «микро-» и «оптоэлектроника».

За время обучения в аспирантуре МГУ и Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) с 1961 по 1963 г. под руководством профессоров В. С. Вавилова и А. Н. Севченко В. Д. Ткачёв стал одним из ведущих специалистов по радиационной физике полупроводников – разделу физики, непосредственно связанному с реализацией космической и оборонной программ в СССР и предполагающему решение трех основных задач:

- определения предельно допустимых значений флюенсов (радиационная стойкость), при которых полупроводниковые материалы



А. Н. Севченко, В. Д. Ткачёв, П. М. Машеров с сотрудниками
проблемной лаборатории полупроводниковой техники

и полупроводниковые приборы на их основе в целом сохраняют возможность полноценного функционирования;

- создания полупроводниковых приборов, устойчивых к воздействию проникающей радиации;

- разработки основ радиационно-ионной технологии.

В. Д. Ткачёв совместно с В. С. Вавиловым и его сотрудниками участвовал в выполнении большого цикла работ, посвященных изучению природы и устойчивости радиационных дефектов в германии, а затем в кремнии и других полупроводниках, которые проводились в ФИАНе. Исследование радиационных дефектов методами анализа спектров и кинетики фотопроводимости стало новым этапом в изучении радиационных нарушений в полупроводниках. Во многих советских и зарубежных лабораториях (Франция, США, Япония) тогда же были проведены исследования, ставшие логическим продолжением работ, первоначально выполненных в ФИАНе. Итоги исследований, перечисленных выше, были обобщены в кандидатской диссертации, защищенной В. Д. Ткачёвым в 1963 г.

В 1964 г. на физическом факультете БГУ по инициативе академиком АН БССР Н. Н. Сироты и А. Н. Севченко была создана проблемная лаборатория полупроводниковой техники. Ее заведующим был назначен В. Д. Ткачёв.



На переднем плане (слева направо) сотрудники кафедры: В. П. Доброго, М. Т. Лапшо, В. Д. Ткачёв, В. Ф. Стельмах, В. Б. Яржембицкий, В. А. Вилькоцкий, В. М. Ломако; на заднем плане справа В. С. Велиев, К. И. Горупа. 1969 г.

Во вновь созданной проблемной лаборатории Валентин Дмитриевич продолжил исследования радиационных нарушений в полупроводниковых материалах. Коллектив лаборатории, сформированный В. Д. Ткачёвым из молодых специалистов – выпускников физического факультета БГУ (костяк коллектива составили его однокурсники: А. В. Юхневич, В. И. Уренёв, П. Ф. Лугаков, В. М. Ломако, В. Ф. Стельмах, Д. С. Доманевский), сразу же приступил к разработке и освоению методик изучения и определения основных свойств полупроводниковых кристаллов, обуславливающих такие параметры полупроводниковых приборов, как тип, концентрация и подвижность основных носителей заряда, удельная проводимость, время жизни основных и неосновных носителей, коэффициенты оптического поглощения. В лаборатории были разработаны и изготовлены: установки для изучения эффекта Холла, фотоэлектромагнитного эффекта и стационарной фотопроводимости, коэффициентов оптического поглощения; криостаты, позволяющие измерять параметры полупроводниковых кристаллов в широком диапазоне температур: от температуры жидкого азота (впоследствии от 4,2 К) до 125 °С и выше. Созданы современные алгоритмы анализа экспериментальных результатов. Это прежде всего анализ темпера-

турных зависимостей концентрации, удельного сопротивления, подвижности, времени жизни основных и неосновных носителей заряда. Создание современной экспериментальной базы для изучения полупроводниковых кристаллов и алгоритмов анализа полученных результатов в широком диапазоне температур позволило Валентину Дмитриевичу с группой коллег-единомышленников приступить к решению по-настоящему большой задачи – подключиться к программе по изучению радиационной стойкости существующих полупроводниковых материалов, в частности кремния, германия и арсенида галлия, выпускавшихся на предприятиях СССР. Цель данной программы, к выполнению которой были привлечены почти все ведущие научные учреждения страны, состояла в установлении основных механизмов взаимодействия частиц проникающей радиации с кристаллами полупроводников. Кроме того, программа предполагала получение фактических данных по изменению параметров полупроводниковых кристаллов и приборов при взаимодействии с частицами высоких энергий различных видов. Эта прикладная программа была нацелена на решение одной из самых актуальных задач, стоящих перед микроэлектроникой, космической, атомной и оборонной отраслями промышленности Советского Союза, – разработку и создание полупроводниковых приборов и электронных устройств на их основе, устойчивых к воздействию проникающей радиации.

Итогом выполнения белорусской части этой программы под руководством В. Д. Ткачёва стала многотомная коллективная монография и справочник по радиационной стойкости полупроводниковых материалов.

Работа над государственной программой, имеющей важное прикладное значение, стимулировала научные исследования в области взаимодействия частиц проникающей радиации с полупроводниковыми кристаллами. Результаты исследований были опубликованы в ряде всесоюзных и международных журналов и представлены на различных конференциях, в том числе на представительных форумах по радиационным дефектам в полупроводниках (Минск, 1972 и 1975 гг.). Под руководством Валентина Дмитриевича ведущие сотрудники проблемной лаборатории (В. М. Ломако, В. И. Уренёв, Д. С. Доманевский, В. Ф. Стельмах и др.) защитили кандидатские диссертации. В 1967 г. В. Д. Ткачёв стал доктором физико-математических наук, защитив диссертацию по теме «Исследование радиационных нарушений в монокристаллах кремния, германия и арсенида галлия». За цикл работ «Исследование радиационных дефектов



П. М. Машеров и В. Д. Ткачѳв

в полупроводниках» в 1972 г. В. Д. Ткачѳву была присуждена премия Ленинского комсомола Беларуси, а в 1974 г. он был избран членом-корреспондентом АН БССР.

В начале 60-х гг. XX в. развитие радиоэлектронной промышленности и полупроводниковой электроники в Беларуси потребовало обеспечения этих наукоемких отраслей высококвалифицированными специалистами по физике и технике полупроводников для научно-исследовательской, производственной и педагогической деятельности. В 1966 г. в БГУ на основе проблемной лаборатории полупроводниковой техники была создана кафедра физики полупроводников БГУ, на которой началась подготовка студентов по специализации «Физика полупроводников и диэлектриков». Кафедру возглавил В. Д. Ткачѳв. В сжатые сроки были разработаны курсы лекций и составлены рабочие программы для их реализации, а также физический практикум, включавший в себя более десятка актуальных лабораторных работ по изучению свойств полупроводниковых материалов. Курс лекций предполагал основательное изучение физики твердого тела и полупроводников, методов получения полупроводниковых кристаллов, современных методов исследования кристаллов кремния, германия и арсенида галлия, поверхностных свойств полупроводников, теории групп, физики и технологии производства полупроводниковых приборов и ряда других предметов.

Весной 1967 г. на кафедре начались занятия. Студентов первой группы набирал лично Валентин Дмитриевич. При этом он руководствовался не только рейтингом оценок, но и результатами собеседований, которые проводил с каждым претендентом, выясняя мотивацию выбора будущей специальности. Первыми преподавателями кафедры стали ведущие сотрудники проблемной лаборатории полупроводниковой техники А. В. Юхневич, П. Ф. Лугаков, В. М. Ломако, В. Ф. Стельмах, И. К. Синещук, В. И. Уренёв и др. Основополагающий курс лекций по физике полупроводников на протяжении многих лет неизменно читал Валентин Дмитриевич. Его лекции по физике полупроводников выделялись научной глубиной, доступностью и ясностью изложения.

Помимо выполнения дипломных и курсовых работ, предусмотренных учебными планами, большое внимание на кафедре уделялось самостоятельной научной работе студентов. Все студенты распределялись между сотрудниками кафедры и проблемной лаборатории. Успешной реализации этого проекта способствовало выделение одного дня в неделю, полностью свободного от занятий.

На кафедре сложились дружественные, доверительные отношения, чему в немалой степени способствовало незначительное различие в возрасте между студентами и преподавателями кафедры.

В 1969 г. состоялся первый выпуск молодых специалистов, которым была присвоена квалификация «Физик» со специализацией по физике полупроводников. Почти все выпускники были распределены на НПО «Интеграл», которое в то время остро нуждалось в специалистах по физике полупроводников и полупроводниковых приборов. Многие из них (Г. С. Жачкин, В. И. Гранько, В. С. Чуваев, В. Г. Войтик и др.) стали ведущими специалистами объединения. Несколько человек пополнили ряды научных сотрудников Академии наук БССР. Выпускники Т. И. Кольченко, В. И. Сопряков и В. Ю. Явид поступили в аспирантуру и остались на кафедре. Тогда же аспирантами В. Д. Ткачёва стали молодые исследователи из разных регионов республики и Советского Союза, а также других стран (первый иностранный аспирант – гражданин Монголии Галимансэ Шилагарди). Большинство из них успешно защитили диссертации, стали кандидатами физико-математических наук и продолжили работу у себя дома.

С момента основания кафедры преподавательская и научно-методическая работа ее сотрудников сочеталась с интенсивными научными исследованиями, которыми руководил В. Д. Ткачёв. Круг его научных интересов был очень широк. Трудно хотя бы кратко оха-

рактизовать все, что было сделано В. Д. Ткачёвым. Поэтому в данной статье мы хотим обратить внимание только на развитие идей, наиболее близких В. Д. Ткачёву как ученому-физику. Таковы прежде всего вопросы радиационной физики полупроводников, а именно изучение природы и свойств дефектов структуры полупроводниковых кристаллов. С ними тесно связаны работы по созданию радиационной и ионной технологий – основных способов формирования приборных структур в современной микро- и нанoeлектронике.

Научная деятельность В. Д. Ткачёва началась более пятидесяти лет назад и оборвалась в 1985 г. При современном чрезвычайно бурном темпе развития физики полупроводников и микроэлектроники этот период уже в значительной мере стал достоянием истории науки. Сегодня ученый редко читает статьи, опубликованные 10, а тем более 20 или 30 лет назад. Однако это вовсе не говорит о том, что все работы, выполненные в то время, потеряли свое значение.

Обращаясь к трудам известных ученых, мы находим в них утверждения, которые в дальнейшем физики будут считать очевидными и общеизвестными. Поток таких трудов не только дополняет, но часто заставляет существенно пересматривать первоначальные точки зрения.

Таким образом, часть результатов становится общеизвестной и их можно найти всюду, а чтобы двигаться дальше, необходимы актуальные данные и свежие идеи, поэтому часто собственные труды основоположников той или иной области физики полупроводников очень быстро становятся достоянием истории науки.

Идеи В. Д. Ткачёва, характер постановки вопросов и те проблемы, которым посвящены его работы, не утратили своего значения и сегодня. Дело в том, что темы работ В. Д. Ткачёва никогда не носили случайного характера. Они были органически связаны с определенными проблемами физики полупроводников, имевшими принципиальное значение и интересовавшими Валентина Дмитриевича на протяжении всей его научной деятельности. Точки зрения на эти фундаментальные вопросы физики взаимодействия высокоэнергетичных частиц с полупроводниковыми кристаллами формировались и уточнялись им многие годы. В. Д. Ткачёв не был бы выдающимся специалистом, если бы представления, сложившиеся в течение интенсивной и целеустремленной работы, потеряли свое значение за короткий срок.

Одной из главных заслуг В. Д. Ткачёва как научного руководителя кафедры, проблемной лаборатории, а затем и отдела в НИИ ПФП



В. М. Уренов



А. А. Патрин



М. В. Борзник



В. Ф. Стельмах



В. Д. Ткачев



П. Ф. Лукашов



В. М. Ломако



Д. С. Доманевский



В. Б. Фролюцкий



М. Т. Лаппо



А. Н. Женов



А. М. Новоселов



Карстен Шредель



О. П. Ермолаев



А. М. Зайцев



В. Ю. Явид



В. В. Шуша



П. Б. Жуковский



Каканаев Румен



Б. Г. Арнаудов



А. Г. Литвинко



М. И. Тарасик



А. М. Янченко



В. А. Вильюцкий



А. В. Муравий



А. В. Юхевич



А. В. Латышев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев



А. В. Гуляев

следует считать стремление и умение поддерживать высокий научный уровень исследований. Собственный пример, беспристрастная и взыскательная, но всегда доброжелательная и компетентная критика работ, привлечение внимания научной общественности к наиболее интересным результатам – все это создавало на кафедре и в отделе подлинную атмосферу научного творчества. Молодые ученые, появлявшиеся на кафедре, не могли не чувствовать этой творческой трудовой обстановки и требовательности В. Д. Ткачёва, которого как руководителя не слишком сильно интересовало формальное выполнение планов, но зато всякий подлинно новый результат он встречал с энтузиазмом. Это, несомненно, способствовало повышению у сотрудников ощущения персональной ответственности. Валентин Дмитриевич был совершенно нетерпим к внутренней недисциплинированности и лени ума. Умея сам предельно четко организовать свою работу (иначе и нельзя было успевать делать столько, сколько делал он!), ученый искренне удивлялся, когда узнавал, что тот или иной сотрудник не успел выполнить порученное дело и ссылался на занятость. Он очень сердился, когда задерживалось написание статьи по законченной и обдуманной работе, оформление диссертации и т. п.

Валентин Дмитриевич был нетерпим также к суесловию и словесной шелухе, которой иные, в особенности начинающие, исследователи порой прикрывали недостаточность и неконкретность информации. Он требовал содержательности и четкости формулировок.

Внутренняя дисциплина и организованность сочетались у В. Д. Ткачёва с внешними их проявлениями. Старые сотрудники кафедры и лаборатории помнят, с какой пунктуальностью, точно в установленный час, он появлялся на работе. Он не считал возможным делать себе какие-либо скидки на здоровье или положение. Трудно вспомнить, когда по его вине задерживалось начало какого-либо семинара или заседания кафедры.

Оценка работы не по формальному признаку соответствия плану, а по существу полученных результатов отнюдь не означала, что В. Д. Ткачёв вообще отрицал плановое начало в научной работе. Он всегда придерживался правила Сергея Ивановича Вавилова, который отмечал, что «отсутствие четкости в плане научного исследования, даже при всем добром желании и дисциплине, может чрезвычайно скверно повлиять на успешность работы. Научная работа всегда идет успешно тогда, когда у человека программа работы ясна и известно, что необходимо для ее обеспечения. В научной работе

самое важное — ясность работы, ее план, а если этого у нас нет, то в этом вина руководства и исполнителей»¹.

Валентин Дмитриевич высоко ценил научные семинары и был их душой. В БГУ научный семинар по актуальным вопросам физики полупроводников В. Д. Ткачёв организовал сразу после создания проблемной лаборатории, а затем он проводился на кафедре физики полупроводников. Эти семинары, на которых с сообщениями нередко выступал и сам Валентин Дмитриевич, были прекрасной школой для научной молодежи. Его выступления либо по поводу докладываемого реферата, либо по оригинальному сообщению всегда были интересными, острыми и зачастую резко критическими. Эрудиция и память В. Д. Ткачёва всегда вызывали удивление. По каждой докладываемой работе он вспоминал всю историю вопроса, охватывавшую иногда десятилетия, поражая точностью знания дат, имен и подробностей работ.

Умея критически отнестись к научным результатам в самых разнообразных областях физики полупроводников, Валентин Дмитриевич с радостью и удовольствием отмечал в работе элементы значимого и интересного. Удовольствие это определялось не только его научным чутьем, позволявшим ему правильно оценивать сделанное, но и его доброжелательностью к научному успеху, радостью за тех, на чью долю этот успех выпал. Эти качества человека и ученого — искренний и живой интерес к науке, радость при известии о каждом новом достижении, продвижении его вперед — были и остаются для всех, кто его знал, одними из наиболее значимых воспоминаний о В. Д. Ткачёве. Но он вовсе не был добреньким. Вспоминаются семинары, на которых он буквально «громил» как своих сотрудников, так и докладчиков из других лабораторий, кафедр и институтов, рискнувших озвучить результаты незавершенной работы. Однако при всей страстности подобная критика была всегда объективной и доброжелательной. Прежде всего В. Д. Ткачёвым руководило искреннее желание помочь человеку найти свое место в науке, а иногда и за ее пределами. Высокая требовательность сочеталась у него с чрезвычайно точным представлением о том, что и с кого можно требовать. Считая семинары одной из главных форм научной жизни кафедры, он посещал их с завидной аккуратностью, подавая пример всем сотрудникам. Семинары В. Д. Ткачёва на кафедре физики полупроводников неизменно привлекали большое количество ученых, студентов и аспирантов

¹ Вавилов С. И. Очерки и воспоминания. М., 1979.

различных научных и учебных учреждений города. Семинар получил статус «городского».

Исключительное внимание В. Д. Ткачѳв уделял научной библиотеке кафедры. Он всегда был осведомлен о новинках специальной литературы, проявляя большую заботу о своевременном пополнении ими библиотеки БГУ и кафедры.

Во время обсуждений, на что стоит делать акцент в развитии экономики Беларуси, часто звучит, что ставка должна быть сделана на нематериалоемкие, энергетически незатратные производства с высокой интеллектуальной составляющей. В середине 70-х гг. прошлого столетия у нас в стране работали предприятия радиоэлектронной промышленности: НПО «Интеграл», выпускающее изделия современной микроэлектроники; завод вычислительной техники БелОМО, специализирующийся на оптомеханических и оптоэлектронных устройствах, и целый ряд других наукоемких производств. В конструкторских бюро и научных подразделениях предприятий, в научно-исследовательских институтах АН БССР, Министерства электронной промышленности и Министерства среднего машиностроения СССР, на кафедрах вузов, в том числе на кафедре физики полупроводников, и в НИИ ПФП БГУ велись разработки проектов использования достижений в области лазерной физики, актуальной элементной базы микроэлектроники, вычислительной техники, оптоэлектроники, робототехники, ядерной энергетики, методов диагностики в медицине и технике. Реализация этих проектов на предприятиях Беларуси требовала не просто инженеров в области радиоэлектроники, оптики, механики, а инженеров-физиков, владеющих фундаментальными знаниями по математике, физике, информационным технологиям. Руководство республики решило сосредоточить подготовку таких специалистов в Белорусском политехническом институте (БПИ, сегодня – Белорусский национальный технический университет (БНТУ)).

В 1976 г. В. Д. Ткачѳв был назначен на должность ректора БПИ – одного из крупных вузов, имеющего в своей структуре научно-исследовательские подразделения. Приняв на себя обязанности ректора БПИ, Валентин Дмитриевич должен был определить главные направления дальнейшего развития института. Это было необходимо уже потому, что в то время институт не имел ясно выраженного научного профиля в области физико-технических наук. На кафедрах и в лабораториях института проводились единичные, мало связанные между собой работы, тематика которых в значительной мере определялась узкими научными интересами и устремлениями

отдельных преподавателей и научных сотрудников. Многие предполагали, что поскольку сам Валентин Дмитриевич работает в области физики полупроводников и микроэлектроники, то наиболее вероятным путем развития института будет избрано направление по профилю физики полупроводников. Однако оказалось, что такого рода предположения были далеки от действительности. Вся последующая история развития физико-технических наук в БПИ показывает, что уже тогда В. Д. Ткачёвым была четко поставлена задача по подготовке инженеров-физиков для самых различных наукоемких предприятий республики.

Он сразу же поднял вопрос о создании инженерно-физического факультета широкого профиля, который смог бы занять достойное место рядом с физическим и радиофизическим факультетами БГУ, лучшими факультетами Минского радиотехнического института (сегодня — БГУИР) и других вузов. Реализовать такое решение было совсем не просто. Для этого нужна была не только сильная поддержка правительства, но и необычайная энергия, дальновидность и организационный талант Валентина Дмитриевича. Первым делом он принялся подбирать и готовить кадры для нового факультета. Были приглашены замечательные физики из Академии наук Беларуси, с физического факультета и из НИИ ПФП БГУ, появление которых на факультете значительно повысило уровень учебной и особенно научной работы. Вместе с коллегами В. Д. Ткачёв взялся руководить молодыми аспирантами, воспитывая из них будущих инженеров-физиков. Уже тогда у него была своя научная школа и он был признанным специалистом в области физики полупроводников в стране.

Время подтвердило правильность стратегии подготовки инженеров с углубленным изучением дисциплин физико-математического профиля и информационных технологий сначала на инженерно-физическом факультете БПИ, а затем на приборостроительном факультете, факультете информационных технологий и робототехники БНТУ, других факультетах университетов республики.

При всей своей занятости В. Д. Ткачёв участвовал и в общественной работе. Он был членом различных комиссий, обществ, редколлежий, организационных комитетов и т. д. Стоит сказать несколько слов о В. Д. Ткачёве как депутате Верховного Совета БССР, о его отношении к своим избирателям. Выполнение Валентином Дмитриевичем депутатских обязанностей не было формальным. Он регулярно, два раза в месяц, проводил прием своих избирателей. На этих приемах обычно присутствовал представитель исполкома, который помогал Валентину Дмитриевичу. В. Д. Ткачёв считал своим дол-

гом оказывать помощь людям. Как депутат он был демократичным и отзывчивым в обращении, человеком высоких духовных качеств, внимательным и чутким к каждому, кто обращался к нему по тем или иным государственным, общественным и личным вопросам. Он всегда находил для этого время и силы, нужные слова. Чаще всего люди уходили от него с чувством глубокой благодарности и удовлетворенности. Наряду с этим, когда дело касалось интересов государства, он был исключительно принципиальным и твердым.

Знающие Валентина Дмитриевича люди характеризовали его как хорошего организатора, человека, который любил науку, умел ради нее много работать и вместе с тем требовал такого же отношения к науке от людей, работающих под его руководством.

***Ш*КОЛА ФИЗИКИ
И ТЕХНИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ
БГУ**



ПОЛУПРОВОДНИКИ В МИРЕ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР

Н. А. Поклонский

Полупроводники – это вещества в твердом и жидком агрегатных состояниях, электрическая проводимость которых на постоянном токе увеличивается при нагревании или освещении. Полупроводники электричества открыл М. Фарадей в 1833 г. Он установил, что электропроводность сернистого серебра (Ag_2S) увеличивается как при внешнем нагревании (теплом от руки или лампы), так и при нагревании возбуждаемым в нем током. Положительную фотопроводимость селена, т. е. увеличение его электропроводности при освещении, обнаружил В. Смит в 1873 г. Позднее были выявлены полупроводниковые свойства закиси меди (Cu_2O) и других веществ. Исследования по физике и технологии полупроводников привели к созданию твердотельной микро- и оптоэлектроники, которая во многом определила прогресс в техносфере (см., например, [1]).

Наибольшее распространение получили полупроводниковые материалы в виде моно- и поликристаллов. При нагревании или освещении полупроводникового образца образующие его атомы достаточно легко ионизируются, в результате чего возникают и подвижные электроны, и подвижные дырки (электронные вакансии в химических связях атомов кристаллической матрицы). Вообще, дырка является элементарным возбуждением электронной подсистемы кристалла, квазичастицей, т. е. воображаемой частицей (В. Гейзенберг, 1931 г.). Электрический заряд дырки равен по величине и противоположен по знаку заряду электрона, а спин дырки (собственный дипольный магнитный момент) равен спину электрона.



Сотрудники кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники. 2008 г.

Связанное состояние электрона и дырки в кристаллических полупроводниках и диэлектриках (иначе – непроводниках тока), осуществляющее перенос энергии, но не электрического заряда, называется экситоном (Я. И. Френкель, 1931 г.).

Согласно зонной теории, энергетический спектр электронов в кристаллах состоит из чередующихся зон (полос) разрешенных и запрещенных значений энергии (А. Вильсон, 1931 г.). Энергетические зоны образованы совокупностью атомных уровней энергии, «расщепившихся» в результате агрегации свободных атомов в кристалл. В кристаллических полупроводниках заполненные электронами состояния валентной зоны (v -зоны) отделены от вакантных состояний электронов в зоне проводимости (c -зоне) запрещенной зоной (энергетической щелью E_g) между дном c -зоны и потолком v -зоны. Электроны заполняют разрешенные зоны энергий в соответствии с принципом Паули: на Q уровнях энергии может находиться не более $2Q$ электронов, так как каждому уровню энергии соответствует 2 состояния спина электрона. Зонная теория состояний электронов в кристаллах основана на использовании при решении уравнения Шрёдингера адиабатического и одноэлектронного приближений: 1) средняя скорость движений ядер атомов около положений равновесия много меньше средней скорости движений электронов; 2) каждый электрон движется в пространственно-периодическом поле, создаваемом ядрами и остальными электронами.

Электромагнитные свойства кристалла зависят от степени заполнения энергетических зон электронами, т. е. от числа электронов в зоне проводимости и от числа не заполненных электронами состояний (электронных вакансий, дырок) в валентной зоне. Если разрешенная энергетическая зона заполнена электронами частично, то под действием внешнего электрического поля электроны перераспределяются по состояниям в этой зоне. При этом появляется наведенная полем анизотропия распределения электронов по скоростям, возникает электрический ток. Поэтому кристалл с частично заполненной электронами c -зоной даже при самых низких температурах остается проводником электричества – металлом. Электроны в полностью заполненной ими v -зоне не могут перераспределяться по состояниям в этой зоне (так как они «заморожены» из-за принципа Паули). Кристалл с пустой c -зоной и заполненной электронами v -зоной является диэлектриком (изолятором, который не проводит постоянный ток, а лишь поляризуется во внешнем электрическом поле). Если же при нагревании или освещении кристалла подводимой к нему энергии достаточно для перевода малой части электронов из v -зоны в c -зону, то его электрическая проводимость увеличивается. Такой кристалл представляет собой полупроводник.

В отличие от типичных металлов (Ag, Cu, Al), в полупроводниках (Ge, Si, GaAs) концентрация и подвижных электронов в c -зоне, и подвижных дырок в v -зоне значительно меньше концентрации образующих кристаллическую матрицу атомов. К тому же для металлов характерно увеличение электрического сопротивления при нагревании и нечувствительность к свету. От диэлектриков полупроводники отличаются лишь меньшей энергетической щелью E_g между краями зон разрешенных значений энергии. У широкозонных полупроводников величина E_g больше (или примерно равна) энергии, необходимой для выхода электрона со дна c -зоны в вакуум. Бесщелевые полупроводники имеют нулевую ширину запрещенной энергетической зоны (например, серое олово, графен). От типичных полупроводников их отличает отсутствие пороговой энергии ($E_g = 0$), необходимой для появления электронно-дырочной пары, от типичных полуметаллов (Bi, Sb, As) – значительно меньшая концентрация электронов в c -зоне и дырок в v -зоне.

Состояние электрона (и дырки) в кристалле характеризуется не только энергией, но и квазиимпульсом. Квазиимпульс – это расширение понятия импульса на случай движения электрона или дырки в кристалле, где их потенциальная энергия периодически зависит от координат (Ф. Блох, Р. Пайерлс, Л. Бриллюэ, 1928–1930 гг.). Если мини-

муму энергии электрона в c -зоне и минимуму энергии дырки в v -зоне соответствует одно и то же значение квазиимпульса, то полупроводник называется прямозонным (символ di). В непрямозонном (символ id) полупроводнике долинам (эквивалентным минимумам энергии электронов c -зоны) и минимуму энергии дырки v -зоны соответствуют разные значения квазиимпульса. Акт межзонной электронно-дырочной рекомбинации – это переход электрона из c -зоны в v -зону, в результате которого происходит исчезновение дырки, т. е. электронной вакансии в v -зоне. При прочих равных условиях вероятность рекомбинации электрона c -зоны и дырки v -зоны с излучением фотона больше в прямозонных полупроводниках, чем в непрямозонных. Это происходит потому, что в прямозонных полупроводниках, в отличие от непрямозонных, законы сохранения энергии и квазиимпульса электрона, дырки и фотона выполняются и без поглощения или испускания фотона (кванта энергии колебаний кристаллической решетки). Именно это обстоятельство обусловило появление полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре [2].

Параметром, характеризующим тепловые свойства кристаллической решетки диэлектриков, полупроводников и металлов, является температура Дебая T_D , при которой возбуждаются практически все моды колебаний атомов (П. Дебай, 1912 г.). При температурах T , больших T_D , теплоемкость трехмерного образца твердого тела не зависит от T (закон Дюлонга – Пти), а при T , меньших T_D , она пропорциональна T^3 . Для легких атомов и прочной химической связи между ними значение T_D велико, для тяжелых атомов и слабой связи – мало.

Значения (при нормальных условиях) энергетической ширины запрещенной зоны E_g (в электронвольтах), ее тип (прямозонный – di , непрямозонный – id), а также значения постоянной кристаллической решетки a_l (в нанометрах), относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и температуры Дебая T_D (в кельвинах) для типичных полупроводников кубической сингонии объединены из справочников в таблицу.

Собственный полупроводник (т. е. i -типа) не содержит атомов примесей, и поэтому концентрация электронов c -зоны равна концентрации дырок v -зоны. В примесном полупроводнике, содержащем атомы примесей в кристаллической матрице, это равенство может нарушаться, и тогда электропроводность в основном обеспечивается одним типом носителей заряда (электронами или дырками). Атомы примесей вводятся в полупроводниковый кристалл в процессе его выращивания из расплава, а также посредством ионной имплантации (внедрения) или диффузии из внешних источников.

Параметры кристаллических полупроводников кубической сингонии

Полупроводник	E_g , эВ	Тип E_g	a_1 , нм	ϵ_r	T_D , К
Нитрид бора (BN)	6,2	<i>id</i>	0,36160	6,8	1730
Алмаз (C)	5,5	<i>id</i>	0,35669	5,7	1860
Карбид кремния (3C-SiC)	2,2	<i>id</i>	0,43596	9,7	1270
Арсенид галлия (GaAs)	1,4	<i>di</i>	0,56536	12,8	344
Кремний (Si)	1,1	<i>id</i>	0,54310	11,5	636
Германий (Ge)	0,66	<i>id</i>	0,56579	15,7	374
Антимонид индия (InSb)	0,18	<i>di</i>	0,64794	17,2	203
Серое олово (α -Sn)	0	<i>di</i>	0,64892	23	220

Процесс введения атомов примесей в полупроводник называется легированием (или допированием). В полупроводнике *n*-типа концентрация электронов в *c*-зоне больше концентрации дырок в *v*-зоне. В полупроводнике *p*-типа концентрация дырок в *v*-зоне больше концентрации электронов в *c*-зоне. Наличие в полупроводнике примесей и собственных точечных дефектов структуры, занимающих узлы или междоузлия кристаллической решетки, приводит к появлению локальных энергетических уровней в запрещенной зоне (реже – в зонах разрешенных значений энергии). Вследствие термической или оптической ионизации примеси приобретают электрический заряд на фоне кристаллической матрицы: водородоподобные доноры – положительный, а водородоподобные акцепторы – отрицательный. Ионизация донора сопровождается появлением электрона в *c*-зоне, а ионизация акцептора – дырки в *v*-зоне. Электрическая активность атома примеси обусловлена тем, что он имеет другую валентность по сравнению с атомом кристаллической матрицы (решетки). Когда атом примеси изовалентно замещает один из атомов, формирующих кристаллическую структуру, то чаще всего эта примесь электрически неактивна (т. е. не создает локализованного состояния с энергетическим уровнем в запрещенной зоне). Изовалентные примеси могут образовывать с атомами матрицы твердые растворы, например $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, где x – доля атомов германия в химическом соединении атомов одинаковой валентности.

Практически все свойства полупроводника зависят от типа и концентрации дефектов кристаллической структуры, а также от температуры, освещения, деформации и других видов воздействия. Как и клетки живых организмов, полупроводники чувствительны к воздействию радиации: ультрафиолетового, рентгеновского

и гамма-излучений, быстрых электронов, протонов, нейтронов, ионов. Энергия, передаваемая кристаллу радиацией (ионизирующим излучением), может привести к смещению атома кристаллической матрицы из положения термодинамического равновесия с образованием первичного радиационного дефекта – междоузельного атома и атомной вакансии. Накопление одиночных (уединенных) первичных радиационных дефектов и их ассоциатов друг с другом или с атомами примесей приводит к тому, что кристаллы теряют прозрачность (окрашиваются), увеличивают объем (разбухают) и др. Если под действием радиации происходят ядерные реакции, то изменяется состав нуклидов в веществе.

В целом полупроводники оптимально сочетают высокую восприимчивость к внешним воздействиям и технологичность операций формирования на их основе стабильных приборов (сенсоров, диодов, солнечных элементов, транзисторов, интегральных схем и др.).

Исследования полупроводниковых материалов и приборов в Беларуси начаты И. Г. Некрашевичем, Н. Н. Сиротой, В. Д. Ткачёвым и В. П. Грибковским в начале 1960-х гг. [3]. Среди достижений на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники БГУ следует отметить:

1) развитие радиационной физики ковалентных кристаллов и дискретных полупроводниковых приборов на их основе;

2) обнаружение оптического аналога эффекта Мёссбауэра в фото-, электро- и катодolumинесценции точечных дефектов кристаллической решетки кремния и алмаза;

3) выявление излучательной рекомбинации электронов и дырок на дислокациях в пластически деформированных кристаллах кремния;

4) наблюдение колебательных «химических» реакций между точечными дефектами атомной структуры в кремниевых диодах с использованием метода емкостной спектроскопии;

5) регистрацию инфранизкочастотных автоколебаний электрического тока в легированных бором пленках поликристаллического кремния микронной толщины;

6) открытие эффекта поглощения микроволнового электромагнитного излучения электронами, «левитирующими» над поверхностью природного кристалла алмаза при его межзонном фотовозбуждении;

7) реализацию технологий изготовления ряда полупроводниковых приборных структур.

В заключение – немного о перспективах развития школы физики и техники полупроводников в БГУ. Ход вещей показывает, что

в последнее время практическое значение приобрели низкоразмерные системы. Низкоразмерная система – это консолидированная система из многих атомов, протяженность которой вдоль хотя бы одного направления в пространстве координат сравнима по величине с одним из параметров размерности длины, характеризующих состояния или процессы в этой системе. Материалы, состоящие в основном из низкоразмерных систем (с характерными размерами примерно от 100 до 1 нм), называются наноструктурированными материалами (или кратко – наноматериалами). Изменяя размеры, форму либо взаимное расположение низкоразмерных систем как компонентов наноматериала, можно управлять его свойствами (например, температурой плавления, растворимостью, прозрачностью) без изменения химического состава.

Для исследования, создания и применения низкоразмерных систем (для диапазона их размеров от 0,1 мкм до 1 нм в одном, двух или трех направлениях) необходимо развивать теорию таких систем. (На схеме показано становление физики полупроводниковых материалов электроники, фотоники, спинтроники и акустики: вчера, сегодня, завтра.)

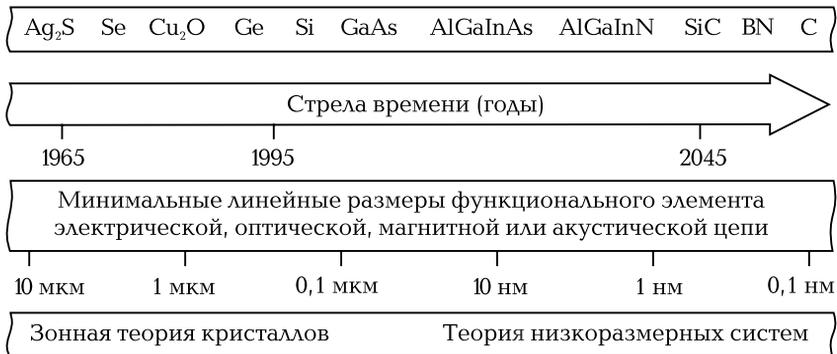


Схема становления полупроводниковых материалов и приборов, а также их теоретических моделей в электронике, фотонике, спинтронике и акустике: вчера, сегодня, завтра

Дело в том, что основой для описания электронных, магнитных, оптических, акустических и тепловых явлений в трехмерных (объемных, массивных) кристаллических диэлектриках, полупроводниках и металлах, размеры которых больше или примерно 0,1 мкм, является зонная теория. Однако для описания низкоразмерных систем

зонная теория неприменима из-за нарушений в них трансляционной симметрии. Не может быть использована для адекватного описания состояний и процессов в системах размером примерно 0,1 мкм и квантовая теория уединенных (одинокных) молекул, являющаяся базой для описания объектов атомного диапазона размеров (0,1–1 нм). Поэтому необходимо развить теорию, рассматривающую состояния и процессы в отдельных молекулах и атомах при учете их агломерации в низкоразмерную систему.

Представляется, что развитие методов создания и диагностики, а также расширение областей применения полупроводниковых систем в электронике, фотонике, спинтронике и акустике нового поколения будет происходить традиционно: от расчетов к эксперименту и далее к практике. Отметим, исходя из [4], некоторые перспективные направления исследований по этой тематике в их физическом, химическом, биологическом и социальном аспектах.

1. Разработка методов математического моделирования и физико-химических принципов молекулярного зодчества низкоразмерных систем и приборных структур на их основе позволит реализовать «малотоннажные» технологии не методом «коллективного подзахвата» и последующего «прямого стогования», а целенаправленно и экономно.

2. Развитие квантовой теории ионизационного равновесия и миграции электронов, дырок и ионов в низкоразмерных полупроводниковых системах для целей водородной и солнечной энергетики. Решение этой задачи позволит создать новые материалы для фотоэлектрических преобразователей и «неотравляемые» электроды для фотолиза воды.

3. Исследование одиночных и консолидированных воронкообразных макромолекул, криволинейных квантоворазмерных проволок, а также наноструктурированных «мягких» материалов для разработки функциональных элементов устройств фотоники, электромеханики, акустики и бионики.

4. Разработка физико-технологических способов формирования ассоциатов из атомов примеси или собственных атомных дефектов структуры в кристаллических полупроводниках при создании твердотельных аналогов катушек индуктивности для силовой электроники.

5. Интегрирование магнетизма в полупроводниковую микро- и нанoeлектронику. Развитие инженерии магнитных низкоразмерных систем в кремниевых пластинах позволит распространить их использование на спинтронику.

6. Формирование низкоразмерных систем (нитей, рулонов и лент) при взаимодействии компрессионных плазменных потоков и интенсивного лазерного излучения с поверхностью кристаллов (Si, SiC, ZnO и др.) в целях создания на их основе элементов технических устройств.

7. Установление зависимости механической прочности широкозонных полупроводников (алмаз, AlN, BN и др.) от положения уровня Ферми (химического потенциала электронов) в запрещенной энергетической зоне позволит предсказывать (и предотвращать) процессы разрушения этих материалов в устройствах высокотемпературной электроники, оптики и механики.

8. Изучение прыжковой миграции электронов по многозарядным точечным дефектам кристаллической матрицы частично разупорядоченных полупроводников для разработки выпрямителя прыжкового электрического тока и элемента Пельтье.

9. Развитие концепции спиновой наномеханики углеродных материалов с дефектами структуры (строения). Это, возможно, позволит прогнозировать внезапные выбросы каменного угля в шахтах при его добыче.

10. Передача знаний, умений и разработок (инноваций) от исследователей к конструкторам, от конструкторов к производителям и осуществление коммерциализации наукоемкой продукции.

Ясно, что при научных изысканиях, исследованиях и в приложениях их результатов должна быть опора на теорию, эксперимент и практику, благодаря которым физика и техника полупроводников возникли и развиваются.

Библиографические ссылки

1. *Вавилов В. С.* Полупроводники в современном мире // Успехи физ. наук. 1995. Т. 165, № 5. С. 591–594.

2. *Алфёров Ж. И.* Двойные гетероструктуры: концепции и применения в физике, электронике и технологии // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172, № 9. С. 1068–1086.

3. *Поклонский Н. А.* Физика полупроводников в Беларуси // Конгресс физиков Беларуси : материалы Конгресса физиков Беларуси, 8–10 июня 2005 г. Минск, 2006. С. 49–62.

4. *Поклонский Н. А.* Физика и техника низкоразмерных систем из углерода // Наноструктурные материалы: Беларусь – Россия – Украина. НАНО-2014 : сб. пленар. докл. IV Междунар. науч. конф., Минск, 7–10 окт. 2014 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. Минск, 2015. С. 121–136.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ, ФОТО-ТЕРМО-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

М. Г. Лукашевич, В. С. Просолович

Сильные электромагнитные поля и давления являются одними из наиболее интересных и важных внешних воздействий на изучаемый объект в экспериментальной физике твердого тела. Исследование электрических, магнитных, гальваномангнитных, пьезоэлектрических и оптических характеристик в широком интервале напряженности полей и давлений позволяет получать информацию о зонной структуре, механизмах релаксации энергии и импульса носителей заряда, энергетических уровнях в запрещенной зоне и других не менее важных характеристиках материалов.

По инициативе заведующего кафедрой физики полупроводников БГУ профессора В. Д. Ткачёва в 1971 г. были начаты исследования полупроводниковых материалов в сильных магнитных и электрических полях, а также при высоких давлениях.

Для их проведения был создан генератор импульсного магнитного поля, позволяющий получать как одиночные импульсы магнитного поля индукцией до 25 Тл, так и последовательность нарастающих по амплитуде импульсов с возможностью синхронного детектирования величин измеряемых в импульсном режиме гальваномангнитных характеристик (магниторезистивный эффект, эффект Холла) полупроводниковых материалов и индукции магнитного поля [1]. По результатам проведенных исследований электрофизических характеристик германия, эпитаксиальных пленок арсенида галлия установлены закономерности изменения магниторезистивного эффекта в квантовом пределе (изменение знака, величины и вида магнитополевой зависимости), проявления в нем классических и квантовых размерных эффектов, а также показана возможность управления этими характеристиками с помощью электрического поля при разогреве электронного газа и неравновесных электронных переходах, обусловленных ударной ионизацией мелких донорных уровней [2, 3].

Начиная с 2000 г. дальнейшее развитие этого направления по изучению управления основными характеристиками гальваномангнитных эффектов (знак эффекта, его величина и функциональная



Ассистент кафедры М. Г. Лукашевич
за исследованием гальваномагнитных
явлений в полупроводниках в сильном
импульсном магнитном поле



В. А. Доросинец
и А. К. Федотов
в научной лаборатории

зависимость от магнитного поля) в целях создания высокоэффективных сред магнитоэлектроники и спинтроники потребовало проведения исследований гальваномагнитных характеристик композиционных материалов, получаемых методами радиационно-термической обработки полимерного предшественника. В работах В. А. Доросинца, М. Г. Лукашевича с сотрудниками химического факультета И. А. Башмаковым, Т. Ф. Тихоновой предложен способ получения углеродных волокон с включениями как немагнитных, так и магнитных нанокластеров по обе стороны перехода «диэлектрик – металл». В таких композитах обнаружено каталитическое действие кластеров кобальта на структурирование углеродной матрицы, переходы «диэлектрик – металл», «суперпарамагнетик – ферромагнетик», установлена размерность электронных процессов переноса заряда в режимах сильной и слабой локализации, найдена корреляция гальваномагнитных и магнитных характеристик. На их основании разработаны рекомендации по получению углеродных композитов с заданными электрическими, магнитными и гальваномагнитными характеристиками с широким спектром механизмов магниторезистивного эффекта для приборов магнито- и спинэлектроники [4].

В период с 2009 по 2012 г. аспирантом Ф. А. Нажимом (Ирак) изучены электрофизические свойства композитов, полученных имплантацией ионов металлов в полиимид, В. С. Волобуевым

(2010–2013) – композиты на основе полиэтилентерефталата, имплантированного ионами магнитных и немагнитных металлов, А. А. Харченко (2011–2014) – магнитные характеристики композитов, получаемых высокодозной имплантацией ионов $3d$ -элементов в полимеры и полупроводники. Установлены технологические режимы получения композиционных материалов с заданными электронно-транспортными, магнитотранспортными и магнитными характеристиками по обе стороны перехода «диэлектрик – металл» в суперпарамагнитном и ферромагнитном состояниях, обнаружены переходы «диэлектрик – металл» и «суперпарамагнетик – ферромагнетик» при имплантации ионов магнитных металлов в полимеры, а также изменение знака, величины и нелинейная зависимость магниторезистивного эффекта от поля [5, 6].

По результатам проведенных исследований гальваномагнитных явлений написаны и защищены пять кандидатских, одна докторская диссертация, получены авторские свидетельства и патенты на 15 новых способов, устройств регистрации магнитного поля гальваномагнитными датчиками, а также подготовлен ряд лабораторных работ, методические рекомендации по их выполнению и курс лекций.

Проведение пьезоспектроскопических исследований в 1970–90 гг. (А. М. Янченко, М. И. Тарасик, В. В. Петров) в кремнии позволило установить ряд особенностей электрических и оптических характеристик кристаллов, имеющих структурные и радиационные дефекты. Так, в работах А. М. Янченко и М. И. Тарасик показано, что в зависимости от величины нагрузки, направления сжатия и положения рекомбинационного уровня в запрещенной зоне время жизни неравновесных носителей может как увеличиваться, так и уменьшаться, а время прилипания – увеличиваться для главных направлений сжатия. На основании полученных результатов разработаны методы определения энергии ионизации глубоких центров при приложении нагрузки, базирующиеся на измерении пьезохолл-эффекта и анализе зависимости времени жизни от давления в области ионизации уровней [7, 8].

Впервые рассмотрено влияние расщепления уровней дефектов, связанное со снятием ориентационного вырождения при приложении одноосной нагрузки на скорость безызлучательной рекомбинации, и показано, что расщепление уровня хотя бы на две компоненты приводит к появлению нелинейностей в зависимостях времени жизни от давления.



Слева направо: А. А. Патрин, В. В. Петров, А. М. Янченко. Начало 1980-х гг.

Результаты проведенного анализа позволили сделать вывод о принципиальной возможности определения типа симметрии структурных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации [9]. На основе полученных данных защищены две кандидатские диссертации.

Пьезоспектроскопические исследования наиболее интенсивных линий поглощения и фотолюминесценции в нейтронно-облученном и легированном алюминием кремнии проведены в работах В. В. Петрова, Я. И. Латушко, В. А. Быковского, что позволило впервые установить симметрию ряда ответственных за них радиационных центров и определить их пьезоспектроскопические параметры. Проведено разделение полос по классам симметрии: 1) кубический (линии при 4627, 5016, 5249, 5542, 5553, 6419, 7464 и 7652 см^{-1}); 2) моноклинный I (2930 см^{-1}); 3) ромбический I (3282, 3495 см^{-1}); 4) триклинный (3014 см^{-1}) [10].

Корреляция данных изотермического и изохронного отжига, пьезоспектроскопического эффекта и влияния внешней подсветки позволила выделить не менее 10 различных радиационных дефектов в Si:Al, подвергнутом воздействию реакторных нейтронов. Показано, что в Si:Al, облученном электронами, радиационный дефект (РД), включающий в свой состав 2 атома алюминия и вносящий

в запрещенную зону уровень $E_v + 0,21$ эВ, обладает тетрагональной симметрией, а дефект, ответственный за серию линий инфракрасного поглощения AM_1 , имеет симметрию T_d [15]. В. Д. Ткачёвым совместно с В. В. Петровым впервые был предложен метод построения реальной формы полос фотопроводимости, основанный на измерении спектральной зависимости дихроичного отношения. Пьезоспектроскопические исследования полос фотопроводимости при $\lambda = 1,45$ и $3,9$ мкм подтвердили их связь с дивакансией, а полос при $\lambda = 2,88$ и $3,14$ мкм – с междоузельными атомами бора и алюминия соответственно. Получены дополнительные аргументы в пользу внутрицентрального характера переходов, ответственных за пик при $\lambda = 3,9$ мкм. Установлено, что ось симметрии электронной конфигурации радиационного кислородосодержащего центра $E_v + 0,24$ эВ направлена по [100]. Показано, что пьезоспектроскопическая методика может быть использована для идентификации центров, имеющих близкие энергии ионизации, но различную симметрию [11].

Значительные успехи были достигнуты и в области изучения оптических свойств основного материала полупроводниковой электронной техники – кремния, содержащего технологические дефекты, в том числе и дислокации. В работах Н. А. Дроздова, А. А. Патрина, В. Д. Ткачёва в 1976 г. на образцах кремния *n*- и *p*-типов проводимости, подвергнутых пластической деформации, с плотностью дислокаций $108\text{--}1010\text{ см}^{-2}$ была обнаружена дислокационная люминесценция [12]. В дальнейшем были проведены исследования температурного гашения линий дислокационной люминесценции, зависимости интенсивности линий от плотности дислокаций, влияния различных примесей на форму и интенсивность линий. Было показано, что форму некоторых линий дислокационного излучения кремния определяют примесные, прежде всего кислородные, облака вокруг дислокаций. Установлено, что дислокационное излучение может быть сильно поляризованным, причем степень поляризации зависит от геометрии и способа введения дислокаций, в то время как для ростовых дислокаций поляризация излучения практически отсутствовала [13, 14].

На основании результатов работ по изучению дислокационной люминесценции кремния были получены авторские свидетельства по люминесцентному способу контроля плотности дислокаций и люминесцентному способу контроля концентрации остаточного кислорода в кремнии, защищены три кандидатские и одна докторская диссертация.

Активно развивались и исследования особенностей оптических, фото- и термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов при прыжковой миграции электронов по атомным дефектам структуры. Так, в работах Н. А. Поклонского и С. Ю. Лопатина построена теория прыжковой фотопроводимости по многозарядным точечным дефектам кристаллической матрицы, а также термо-ЭДС для случая прыжков электронов (или дырок) по водородоподобным атомам примеси [15, 16].

Библиографические ссылки

1. Устройство для измерения гальваномагнитных параметров полупроводников : а. с. 885942 СССР : G 01 R 33/12 / С. С. Лабус, М. Г. Лукашевич, В. Ф. Стельмах; дата публ.: 23.03.1984.
2. Гришанов В. А., Лукашевич М. Г. Управление магниторезистивным эффектом в многослойных структурах с барьером Шоттки // Приборы и системы управления. 1992. № 4. С. 40.
3. *Lukashevich M. G., Bogershausen M., Micklitz H.* Magnetoresistance and Hall effect of warm and nonequilibrium electrons in high-purity n-GaAs // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1994. V. 144, № 42. P. 377–382.
4. Получение и электрофизические свойства кобальтсодержащих углеродных волокон / И. А. Башмаков [и др.] // ФТТ. 2002. Т. 44, № 9. С. 1614–1621.
5. Magnetoresistive effect in PET films with iron nanoparticles synthesized by ion implantation / М. G. Lukashevich [et al.] // *The Open Applied Physics Journal*. 2010. № 3. P. 1–5.
6. Correlation of Electronic and Magnetic Properties of Thin Polymer Layers with Cobalt Nanoparticles / A. Kharchenko [et al.] // *Part. Part. Syst. Char.* 2013. V. 30, № 2. P. 180–184.
7. Влияние деформации одноосного сжатия на время жизни неравновесных носителей заряда в кремнии / А. А. Патрин [и др.] // ФТП. 1974. Т. 8. С. 2038.
8. Тарасик М. И., Янченко А. М. Изменение энергии ионизации А-центра в кремнии при одноосной деформации // ФТП. 1977. Т. 11, № 7. С. 1435–1436.
9. Тарасик М. И., Янченко А. М., Шварков Д. С. Исследование свойств симметрии дефектов структуры в полупроводниках методом пьезо-холл-эффекта // ФТП. 1988. Т. 22, № 1. С. 97–100.
10. Быковский В. А., Латушко Я. И., Петров В. В. ИК-поглощение и излучательная рекомбинация на радиационных дефектах в кремнии, легированном алюминием // ФТП. 1987. Т. 21, № 11. С. 2039–2043.
11. Акулович Н. И., Петров В. В., Ткачѳв В. Д. Определение реального вида полос примесной фотопроводимости в облученном быстрыми нейтронами кремнии по измерению пьезодиохроизма // ФТП. 1979. Т. 13, № 2. С. 354–357.
12. Дроздов Н. А., Патрин А. А., Ткачѳв В. Д. Рекомбинационное излучение на дислокациях в кремнии // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23, № 11. С. 651–653.

13. Drozdov N. A., Patrin A. A., Tkachev V. D. On the nature of the dislocation luminescence in silicon // Phys. Stat. Sol. (b). 1977. V 83, № 2. P. 137–139.

14. Drozdov N. A., Patrin A. A., Tkachev V. D. Modification of the dislocation luminescence spectrum by oxygen atmospheres in silicon // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. V 64, № 1. P. 63–65.

15. Поклонский Н. А., Лопатин С. Ю. Стационарная прыжковая фотопроводимость по многозарядным примесным атомам в кристаллах // ФТТ. 1998. Т. 40, № 10. С. 1805–1809.

16. Поклонский Н. А., Лопатин С. Ю. Решеточная модель термо-ЭДС при прыжковой проводимости: применение к нейтронно-легированному кристаллическому германию // ФТТ. 2001. Т. 43, № 12. С. 2126–2134.

СОЗДАНИЕ НОВЫХ МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

А. В. Юхневич

Целенаправленное управление дефектно-примесным взаимодействием, обеспечивающее требуемые параметры полупроводниковых структур и создаваемых на их базе приборов, лежит в основе развиваемой во всем мире дефектно-примесной инженерии полупроводников. Разработка данного направления предполагала прежде всего исследования структуры и поведения радиационных дефектов в полупроводниках. Для изучения воздействия на полупроводники (кремний, германий, арсенид галлия, алмаз) облучения электронами, гамма-квантами, реакторными нейтронами, высокоэнергетичными ионами на кафедре разработаны и применяются следующие эффективные методики: ЭПР, ИК-поглощения, фото- и катодолюминесценции, фотопроводимости, измерения времени жизни неравновесных носителей заряда, эффекта Холла и др.

Вместе с В. Д. Ткачёвым в становлении научной школы кафедры физики полупроводников на этапе развития радиационной физики полупроводников и разработки технических и технологических приемов инженерии радиационных дефектов большое участие принимали А. В. Юхневич, В. М. Ломако, П. Ф. Лугаков и др.

Под руководством И. Г. Некрашевича во время учебы в аспирантуре А. В. Юхневичем была создана одна из первых в республике установок для получения пленок PbS методом вакуумного напыления и измерения их электрофизических параметров. Во время ста-

жировки в лаборатории оптических исследований полупроводников (руководитель С. М. Рывкин) Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе (ФТИ) А. В. Юхневичем изучалась люминесценция кристаллов кремния и германия – как исходных, так и подвергнутых воздействию жесткой радиации. Были разработаны конструкции и изготовлены криостаты для работы при температурах жидких гелия и азота. Выполненные конструкторские и инженерные работы позволили расширить спектральный диапазон исследований в длинноволновую область с помощью оригинальных охлаждаемых приемников излучения на основе Ge, а также усилителя их сигналов, применения нестандартных дифракционных решеток в монохроматоре.

С 1964 г. исследования, начатые в ФТИ, были продолжены А. В. Юхневичем в БГУ. Работы велись на вновь созданной экспериментальной установке, возможности которой превосходили возможности ленинградской. Параллельно изучались электрофизические и фотоэлектрические свойства образцов кремния, преимущественно подвергнутых радиационному воздействию различных видов. Из результатов, полученных во время работы на кафедре физики полупроводников, можно выделить следующие [1–3]:

- обнаружены новые локальные излучающие структурные дефекты (ИСД) в монокристаллах кремния; определен атомный состав ряда ИСД;

- выявлен характер оптических электронных переходов в ИСД, включая переходы с участием фононов и переходы без участия фононов (оптический аналог эффекта Мёссбауэра), а также типы и энергии локальных и решеточных фононов, принимающих участие в переходах;

- выполнены пьезоспектроскопические исследования низкотемпературной люминесценции ряда обнаруженных ИСД, что позволило определить симметрию последних и уточнить их атомную структуру;

- изучены спектры «собственной» и «примесной» фотопроводимости, а также спектры фото-ЭДС образцов кремния с использованием оригинальных дополнительных узлов экспериментальной установки собственной конструкции и изготовления, позволяющих реализовать бесконтактную СВЧ-регистрацию фотопроводимости и непосредственное дифференцирование спектров; в результате были уточнены типы и энергии фононов, принимающих участие в соответствующих электронных переходах;



А. В. Юхневич исследует электрофизические параметры структур кремния. 1965 г.

- обнаружены необычные особенности прямой ветви вольт-амперных характеристик кремниевых $p-n$ -переходов, подвергнутых радиационному воздействию, – наличие множества стабильных гистерезисных петель при низкой температуре; установлена связь параметров таких петель с типом дефектов структуры кристалла.

К научно-техническим результатам можно также отнести разработку конструкций и технологий изготовления следующих оригинальных приборов и узлов экспериментальных установок, позволивших повысить точность и надежность измерений:

- криостаты для работы при температурах 300–5 К, позволяющие на одном образце получать спектры фото- и катодolumинесценции, а также бесконтактной СВЧ-фотопроводимости полупроводника в условиях одноосной деформации сжатия;

- специальный охлаждаемый объемный СВЧ-резонатор на частоту 10 ГГц, размещаемый в криостатах, предназначенный для бесконтактной регистрации фотопроводимости помещенных в него образцов полупроводника при их одноосной контролируемой деформации; криовакуумный волновод для ввода/вывода СВЧ-колебаний в/из резонатора;

- электронный блок регистрации СВЧ-сигналов фотопроводимости, включающий мостовую схему компенсации фоновых СВЧ-колебаний, позволяющий усиливать полезные сигналы в гомодинном и супергетеродинном режиме на промежуточных частотах 30 или 60 МГц, с узкополосным усилением и синхронным детектированием сигналов фотопроводимости на частоте модуляции излучения;

- узел прямого дифференцирования спектров, позволяющий непосредственно регистрировать спектры первой и более высоких производных сигнала по длине волны. Принцип функционирования узла основан на периодическом гармоническом смещении спектра анализируемого или возбуждающего излучения поперек направления выходной щели монохроматора и узкополосном усилении результирующего сигнала на частоте смещения или на частотах ее гармоник. Этот прибор используется при анализе формы маловыразительных частей спектров излучения, поглощения, фотопроводимости и фото-ЭДС;

- узел измерения степени поляризации излучения, включающий управляемый деполяризатор, вращающийся поляризатор и узкополосный усилитель сигнала на удвоенной частоте вращения плоскости поляризации; необходимость разработки и использования этого узла проявилась в ходе получения и анализа результатов пьезооптических экспериментов.

С 1973 г. в других подразделениях БГУ (кафедра физической химии, НИИ ФХП) А. В. Юхневичем велись работы по исследованию физических и химических свойств поверхности полупроводниковых кристаллов [1, 4]. Им были созданы устройства, включающие оригинальные детали и узлы собственной конструкции и изготовления:

- новая оптическая установка для изучения фото- и катодолюминесценции кремния с возможностями оптических установок, описанных выше, отличающаяся использованием для охлаждения образцов криогенного узла (микроохладителя) космического назначения;

- установка имплантации различных ионов с энергиями 10–100 кэВ на основе магнитного масс-спектрометра МИ-1301;

- сверхвысоковакуумная установка, предназначенная для испытания полупроводниковых сенсоров и анализаторов состава разреженных потоков газа в вакууме;

- сканирующий туннельный микроскоп-спектрограф-литограф. Прибор позволяет проводить исследование и модификацию рельефа поверхностей с субангстремным пространственным разрешением в диапазоне температур 80–300 К; его конструкция дает возможность проводить опыты в газовой среде различного контр-

лируемого состава, а также в сверхвысоком вакууме; реализована способность встраивания в изучаемую поверхность новых атомов, молекул и ионов непосредственно в ходе опыта;

- комплекс приборов и устройств, позволяющий реализовать все основные технологические операции планарной микрофотографии, которые применяются для формирования на поверхности полупроводника экспериментальных микро- и наноструктур, имеющих необходимую 2D- или 3D-форму. Отличительная особенность данного фотолитографического комплекса – возможность работать с образцами полупроводника малых размеров (с площадью поверхности до 1 мм²). Основные составляющие комплекса: установка вакуумного напыления различных слоев, малогабаритная установка нанесения слоев фоторезиста, модернизированный генератор изображения фотошаблонов ЭМ-559, оригинальный проекционный фотолитограф, уменьшающий рисунок фотошаблона.

Был также разработан ряд оригинальных программ по моделированию на атомном уровне процесса химического растворения монокристаллов типа алмаза [5, 6].

Кроме отмеченных выше конструкторских и научно-технических достижений к основным научным результатам, полученным в этот период, можно отнести следующие:

- установлено, что в структуре поверхности кристалла кремния, модифицированной в различных экспериментальных условиях, не имеется образований, оптические спектры которых содержат узкие (мёссбауэровские) линии излучения/поглощения, подобные наблюдаемым в спектрах ИСД в объеме кристалла;

- выявлены физико-химические особенности процесса локальной зондовой электрополевой модификации поверхности кристалла кремния;

- определена кристаллографическая ориентация и рельеф микро- и нанопереходов монокристалла кремния, самоформируемых вблизи краев химической маски на поверхности (001), при травлении кристалла в различных растворах;

- определены свойства перспективных растворителей кремния, позволяющих реализовать «идеальную» химическую полировку поверхностей монокристалла и формировать сложные микро-/наноустройства с атомной точностью методом маскированного растворения кристалла.

Много внимания уделялось разработке твердотельных газовых сенсоров и газоанализаторов, принцип функционирования которых основан на регистрации изменений физических характеристик по-

верхности твердых тел при адсорбции и десорбции молекул анализируемых газов. Перспективность этих приборов обусловлена потенциальной возможностью создания анализаторов химического состава газов и жидкостей, сочетающих высокую чувствительность и селективность (до идентификации одиночных молекул) с исключительно малыми габаритами (меньше микрометра) и энергопотреблением (доли милливатта).

В результате были разработаны конструкции и микроэлектронная технология изготовления оригинальных кремниевых газовых сенсоров, приспособленных для работы в вакууме [1, 4]. На основе этих сенсоров были созданы оригинальные газоаналитические системы, предназначенные для диагностики разреженных атомных и молекулярных потоков в вакууме, которые могут использоваться для решения ряда научных и технических задач в космонавтике. Например, была разработана, изготовлена и принята в эксплуатацию в НПО «Энергия» им. С. П. Королёва система контроля герметичности теплотранспортных модулей космических ядерных энергетических установок, превосходящая по чувствительности и пространственной разрешающей способности все известные ранее средства измерений. За эту работу в 1987 г. авторы были удостоены премии Совета министров СССР. Именно долгосрочное взаимопольное сотрудничество с НПО «Энергия» на договорной основе позволило обеспечить экспериментальную часть исследований достаточно современным дорогостоящим оборудованием.

Библиографические ссылки

1. Юхневич А. В. Некоторые особенности атомной структуры монокристаллов кремния // Избр. науч. тр. Белорус. гос. ун-та : в 7 т. Минск, 2001. Т. 4. С. 89–122.
2. Gordon D. The optical properties of luminescence centres in silicon // Physics Reports. 1989. V. 176, № 3, 4. P. 83–188.
3. Yikhnevich A. V. Towards a silicon laser based on emissive structural defects // Solid-State Electronics. 2007. V. 51, № 3. P. 489–492.
4. Юхневич А. В. Формирование нанорельефа поверхности монокристаллов кремния в химически активных средах // Двадцать конкурсных лет, БРФФИ. Минск, 2012. С. 502–520.
5. Юхневич А. В., Майер И. А., Усенко А. Е. К моделированию технологии изготовления кремниевых МЭМС/НЭМС приборов // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. Минск, 2013. Вып. 28. С. 123–126.
6. Юхневич А. В., Майер И. А., Усенко А. Е. К технологии формирования МЭМС/НЭМС-конструкций // Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. Минск, 2016. Вып. 31. С. 50–55.

РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

В. М. Ломако

Научный коллектив под руководством В. М. Ломако начал формироваться в середине 60-х гг. XX в., когда заведующий проблемной лабораторией полупроводниковой техники В. Д. Ткачёв поставил задачу исследования радиационных эффектов в p – n -структурах и лазерных диодах на основе арсенида галлия. Вскоре эта область исследования была дополнена изучением кинетических явлений в GaAs. В начале 1970-х гг. тематика расширилась за счет изучения радиационных дефектов в гетероструктурах на основе GaAs, в других соединениях A^3B^5 , а также в кремниевых p – n -структурах, приборах и интегральных микросхемах (ИМС).

Изучался объемный, выращенный по методу Бриджмена или Чохральского GaAs, легированный элементами II (Cd, Zn), IV (Si, Ge, Sn) и VI (S, Se, Te) групп, нейтронно-трансмутационно-легированный арсенид галлия, а также эпитаксиальные пленки, полученные методом жидкофазной или газофазной эпитаксии. В качестве диффузантов при изготовлении p – n -переходов применялись элементы II (Be, Zn) или VI (Te) группы. Изучались также одинарные и двойные гетероструктуры GaAs–AlGaAs, GaAs–GaP, InGaAs–InP, барьеры Шоттки на GaAs и InP и др. Первые гетероструктуры для исследований были предоставлены академиком Ж. И. Алфёровым.

Исследовалось влияние таких видов проникающей радиации, как гамма-излучение Co^{60} , гамма-излучение со спектром тормозного излучения электронов с энергией 28 МэВ в вольфрамовой мишени, электронами с энергией 2,5–100 МэВ, протонами с энергией 18 и 660 МэВ, быстрыми реакторными и монохроматическими нейтронами 14 МэВ, альфа-частицами от радиоизотопных источников ^{210}Po и ^{239}Pu с энергией 4,7 и 4,5 МэВ соответственно.

Было показано, что скорость удаления носителей при различных видах облучения не зависит от типа легирующей примеси и определяется только видом и энергией облучающих частиц. Установлено, что изменение подвижности носителей при облучении гамма-квантами и электронами 2,5–10 МэВ определяется изолированными дефектами и с ростом энергии электронов до 28 МэВ основной вклад начинают давать области скопления дефектов (ОСД). Расчеты показали, что при облучении GaAs гамма-квантами с энергией 15–25 МэВ число дефектов, образованных продуктами фотоядерных реакций, существенно

превышает число дефектов, введенных за счет вторичных электронов и позитронов. Возникающие в результате фотоядерных реакций фотопротоны будут приводить к введению в полупроводник в основном точечных дефектов. Под действием же фотонейтронов и ядер отдачи создаются каскады смещений, из которых формируются области скопления дефектов. В случае нейтронного облучения основную роль в изменении концентрации и подвижности носителей заряда играют ОСД и характер изменения электрических свойств кристаллов также не зависит от типа указанных легирующих примесей [1].

Исследование зависимости времени жизни в GaAs от уровня легирования по спаду электролюминесценции с разрешением $5 \cdot 10^{-11}$ с показало, что оно не зависит от типа легирующих примесей и определяется только их концентрацией вплоть до 10^{19} см^{-3} , при которой время уменьшалось до $4 \cdot 10^{-10}$ с. В сильнолегированных компенсированных эпитаксиальных структурах спад интенсивности излучения после прекращения инжекции происходит не по экспоненциальному, а по гиперболическому закону.

Сотрудниками В. М. Ломако, А. М. Новосёловым, А. С. Прохоренко, В. Д. Ткачёвым, Н. Н. Шавелем были проведены детальные исследования радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда в GaAs в зависимости от типа примеси, уровня легирования кристаллов, вида облучения и установлены аналитические взаимозависимости между этими параметрами [2]. Обобщенный анализ теоретических и экспериментальных данных позволил сделать вывод, что в GaAs могут вводиться две области скопления дефектов Q - и R -типов. Высота потенциального барьера для Q -областей равна 0,22 эВ, для R – 0,26 эВ.

Формирование стабильных областей скопления дефектов описывается отношением диффузионных длин компонент пар Френкеля к размеру каскада смещений, определяемому энергией атомов отдачи E_p . При $E_p < 2,8$ кэВ области скопления дефектов не образуются вследствие диффузии первичных дефектов из каскада с образованием изолированных дефектов в матрице. Совокупность полученных результатов позволила заключить, что при $2,8 < E_p < 15$ кэВ из каскадов выходят вакансии мышьяка и формируются стабильные области (Q -области) скопления дефектов, ядра которых состоят из дефектов галлиевой подрешетки и междоузлий мышьяка. При $E_p > 15$ кэВ размеры каскадов превышают длину диффузии всех компонент пар Френкеля и формируются R -области, включающие в себя также вакансионные дефекты подрешетки мышьяка. При $T = 260$ °С в ядрах происходит отжиг дефектов, относящихся к подрешетке мышьяка. Освободившиеся при этом V_{As} диффундируют

в матрицу и исчезают на стоках, I_{As} остаются в ядрах, т. е. происходит перестройка R -областей в Q -области. При температуре отжига $T = 450^\circ\text{C}$ в ядрах скоплений наблюдается отжиг дефектов подрешетки Ga, завершающийся процессом аннигиляции V_{Ga} и I_{Ga} . В результате такого отжига происходит исчезновение потенциального барьера и практически полное восстановление времени жизни и подвижности носителей. При энергиях электронов $E_e > 10$ МэВ кроме изолированных дефектов начинают вводиться области скоплений дефектов Q -типа. Разработаны аналитические модели, описывающие удаление и рекомбинацию носителей на ОСД и позволяющие определить высоту потенциального барьера ОСД, концентрацию, энергетическое положение уровней основных компенсирующих центров и кинетику их отжига в ядрах ОСД. В результате проведенных расчетов было установлено, что при рекомбинации на ОСД возрастание коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда с ростом уровня легирования обусловлено дрейфом неравновесных носителей в электрическом поле ОСД.

Изучена термическая стабильность основных компенсирующих и рекомбинационных центров, вводимых различными видами проникающей радиации. Изучен рекомбинационно ускоренный отжиг дефектов, определяющих радиационное изменение времени жизни, и предложена модель для его объяснения.

Установлены критериальные параметры, определяющие радиационную стойкость инжекционных квантовых генераторов на основе GaAs различного типа, и показана возможность прогнозирования их стойкости к различным видам проникающей радиации. Результаты проведенных исследований обобщены в коллективной монографии [3].

Кроме исследования интегральных электрофизических параметров перечисленных полупроводниковых материалов большое внимание уделялось спектроскопическим исследованиям технологических и радиационных дефектов, которые необходимо было проводить на приборных структурах типа p - n -перехода, барьера Шоттки или гетероперехода. Наиболее результативным и чувствительным в этом случае является метод DLTS-спектроскопии, позволивший изучить конфигурационную бистабильность ряда дефектов.

Метод нестационарной емкостной спектроскопии оказался непревзойденным по эффективности исследования нерезонансных вибронных взаимодействий в полупроводниках благодаря возможности легко управлять степенью заполнения локального уровня электронами в пределах от 0 до 1 путем приложения к образцу напряжения, инжекции неосновных носителей или совместного воздействия напряжения и оптического возбуждения. В ряде случаев

сильное электрон-решеточное взаимодействие вызывает конфигурационную бистабильность дефектов, проявляющуюся в зависимости наблюдаемого спектра глубоких уровней от предыстории образцов и условий эксперимента. Например, для радиационного конфигурационно-бистабильного центра $EM1$ в GaAs, в отличие от известных, обнаружена температурная инверсия изовалентных состояний [4]. В изучение этого явления определяющий вклад внесли В. А. Иванюкович, В. И. Карась, В. М. Ломако.

Результаты практических исследований радиационных изменений электрофизических свойств вышеперечисленных материалов были изданы в виде справочников по радиационной стойкости полупроводниковых материалов Министерством электронной промышленности СССР. Научные результаты обобщены в семи кандидатских и двух докторских диссертациях.

Библиографические ссылки

1. *Kolchenko T. I., Lomako V. M., Tarutin I. G.* Introduction of defect clusters in GaAs by high-energy gamma rays // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1979. V 56. P. 387.

2. Квантовая эффективность и время жизни неравновесных носителей тока в арсенидгаллиевых диодах / В. М. Ломако [и др.] // ФТП. 1976. Т. 10, № 7. С. 1233–1236.

3. *Аствацатурьян Е. Р., Громов Д. В., Ломако В. М.* Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. Минск, 1992. С. 219.

4. Конфигурационно-бистабильные перестройки дефектов в полупроводниках – фазовый переход второго рода / В. А. Иванюкович [и др.] // ФТП. 1989. Т. 23. С. 264–267.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

П. Ф. Лугаков

В области электрофизических исследований дефектов структуры в кремнии больших успехов достигла научная лаборатория, возглавляемая П. Ф. Лугаковым. С момента создания кафедры физики полупроводников исследования по данной тематике проводились в рамках научной группы. Затем в 1971 г. на базе этой научной группы была образована лаборатория радиационной физики полу-

проводников в НИИ ПФП, руководителем которой с 1971 по 1994 г. был кандидат физико-математических наук, доцент П. Ф. Лугаков.

Кадровый потенциал лаборатории формировался выпускниками кафедры физики полупроводников БГУ (Л. А. Казакевич, С. П. Клочан, И. И. Колковский, В. В. Красковская, В. И. Кузнецов, Т. А. Лукашевич, В. В. Лукьяница, И. М. Филиппов, А. В. Цикунов, В. В. Шуша и др).

Область исследований лаборатории – изучение процессов дефектообразования в основном полупроводниковом материале твердотельной электроники – кремнии, влияния на его электрофизические свойства воздействием таких видов жесткого облучения, как гамма-кванты, электроны, протоны, нейтроны и т. д.

Установлен энергетический спектр уровней и природа основных компенсирующих и рекомбинационно активных радиационных дефектов (РД) в кремнии различного примесно-дефектного состава при облучении частицами высоких энергий широкого спектра [1].

Выявлена природа кислородо- и углеродосодержащих комплексов, вносящих в запрещенную зону близкие энергетические уровни у $E_v + 0,33$ эВ как комплексы COV_2 и C_iO_i . Описан механизм образования комплексов COV_2 путем захвата на начальных этапах генерируемых облучением вакансий присутствующими в исходных кристаллах углерод-кислородными ассоциациями C_sO_i . Образование комплексов C_iO_i , которые являются доминирующими при более высоких интегральных потоках облучения, происходит в результате вытеснения собственными междоузельными атомами атомов углерода в междоузельное положение и последующего захвата их междоузельным кислородом. Показано, что соотношение между концентрациями комплексов COV_2 и C_iO_i , а также степень радиационного изменения электрофизических характеристик зависят от состояния и характера распределения фоновых примесей в объеме кристалла, которые можно менять, проводя предварительную термическую обработку кристаллов или используя при выращивании кремния определенные условия воздействия на расплав магнитного поля [2].

Сотрудниками Л. А. Казакевичем, И. И. Колковским, В. И. Кузнецовым, П. Ф. Лугаковым, А. Р. Салмановым установлено, что при отжиге E -центров формируются более сложные фосфорсодержащие комплексы («фосфор – дивакансия»), а восстановление электрической активности фосфора при термической обработке облученного кремния происходит в результате распада таких комплексов. Определены их параметры. Предложена система квазихимических реакций, описывающая процессы перестройки радиационных дефектов (РД) при отжиге в интервале температур 100–180 °С за счет



Лаборатория радиационной физики полупроводников
НИИ ГФП им. А. Н. Севченко, заведующий лабораторией –
П. Ф. Лугаков (*третий слева во втором ряду*). Конец 1990 г.

взаимодействия E -центров между собой и с междоузельными комплексами C_iC_s [3]. Сделано заключение об определяющей роли в процессах комплексообразования и отжига РД полей упругих напряжений, создаваемых различными структурными ростовыми и технологическими дефектами, такими как дислокации, фрагменты или зародыши известных микродефектов A -, B - и D -типов, кластеры легирующих металлов. Показано, что при увеличении плотности дислокаций из-за эффективного комплексообразования и исчезновения вакансий и междоузельных атомов у дислокаций скорость введения дефектов, в состав которых входит один первичный РД (A -, E -центры, междоузельный углерод, комплексы C_iC_s), уменьшается, дивакансий – сохраняется неизменной, а комплексов «углерод – кислород – дивакансия» – возрастает. Математически описано накопление РД с ростом плотности дислокаций, рассчитаны отношения вероятностей взаимодействия первичных РД с элементами дислокационных линий и атомами химических приме-

сей. Под влиянием далекодействующих полей упругих напряжений дислокаций вакансии и междоузельные атомы мигрируют к ним, где они либо исчезают, либо участвуют в комплексообразовании друг с другом и с атомами примесей, что обуславливает перестройку в процессе облучения примесной атмосферы дислокаций в примесно-дефектную, состоящую из РД и их примесных компонентов [4].

Доказано, что при наличии в кристаллах повышенной плотности дислокаций процессы отжига E -центров и междоузельного углерода не подчиняются кинетике реакций первого порядка, а описываются их направленной диффузией под воздействием полей упругих напряжений к дислокациям. Для A -центров, дивакансий и комплексов C_iC_s , образующихся вблизи дислокаций, характерно уменьшение температуры, энергии активации отжига и значений частотного фактора за счет деформации и искажения кристаллической решетки, приводящих к изменению энергии связи или энергии миграции дефектов, а также числа, расположения узлов кристаллической решетки и расстояния между ними. Показано, что при термообработке облученных кристаллов с участием A -, E -центров и междоузельного углерода формируются устойчивые к более высоким температурам комплексы COV_2 и PV_2 , происходит дальнейшая перестройка примесно-дефектной атмосферы дислокаций и пространственное перераспределение дефектов и примесей.

Выявлено, что локализация заряженных дефектов в скопления приводит, вследствие воздействия возникающего потенциального барьера Ψ , к уменьшению их энергии активации термической ионизации (расширению интервала температур ионизации дефектов). На основании этого разработан метод расчета потенциальных барьеров и размеров областей скопления дефектов.

Экспериментально определена структура образующихся в кремнии при облучении высокоэнергетическими электронами, протонами, нейтронами областей скопления дефектов (ОСД), состоящих из ядра, в состав которого входят собственные дефекты (димеждоузлия, дивакансии, четырехвакансии, вносящие в запрещенную зону уровень $E_c - 0,12$ эВ, шестивакансии $- E_v + 0,29$ эВ и т. п.), и периферии, сформированной из комплексов, образующихся при взаимодействии вакансий и междоузельных атомов кремния с атомами присутствующих в кристалле примесей (A -, E -центры, комплексы C_iC_s , COV_2 и т. п.). Оценены потенциальные барьеры, размеры ядра и периферии областей скопления дефектов. Размер периферии уменьшается с ростом содержания приме-

сей в кристаллах и примерно на порядок превышает размер ядра. Величина потенциального барьера периферии в 2–3 раза меньше величины потенциального барьера ядра. Выявлено, что параметры областей скопления дефектов зависят от температуры облучения и энергии бомбардирующих частиц: реакторные нейтроны и протоны с энергией 10–50 МэВ создают скопления с плотными ядрами малых размеров и нейтральной частью, тогда как для протонов более высоких энергий характерно образование скоплений с ядрами больших размеров и меньшей плотностью дефектов в них. Установлено, что ОСД в дислокационном кремнии представляют собой скопления собственных РД и практически лишены периферии кислородосодержащих комплексов, которые накапливаются у дислокаций и формируют их примесно-дефектную атмосферу. Разработана статистика рекомбинации неравновесных носителей заряда (ННЗ) на ОСД, в рамках которой наблюдаемые на опыте особенности (повышенная чувствительность к уровню возбуждения, аномально высокие сечения захвата и т. д.) объясняются искривлением потенциального рельефа вокруг ОСД, характеризуемым не только высотой эффективного потенциального барьера, как это делалось ранее, но и соотношением объемов внешней и внутренней областей кластера. Разработана модель рекомбинации носителей в кремнии, содержащем ОСД, позволяющая объяснить совокупность экспериментальных результатов по исследованию температурных и инжекционных зависимостей [5]. Обнаружено, что степень радиационного изменения времени жизни ННЗ при облучении дислокационно-кремния определяется изменением как скорости образования дополнительных рекомбинационных центров (радиационных дефектов), так и рекомбинационной активности дислокаций из-за нейтрализации их разорванных связей. Кроме того, наличие у дислокаций потенциальных барьеров приводит к пространственному разделению ННЗ и уменьшению скорости их рекомбинации на РД в матрице кристалла. Определены и проанализированы значения коэффициентов радиационного изменения электрофизических характеристик и начальных скоростей образования РД в кристаллах, полученных различными методами. Отмечено, что ряд характерных особенностей образования при облучении компенсирующих, рассеивающих и рекомбинационных центров объясняется их неоднородным распределением из-за наличия ростовых структурных нарушений различного типа, вблизи которых концентрация фоновых примесей, участвующих в комплексообразовании, повышена. В бездислокационном кремнии, выращенном в атмосфере ар-

гона, установлены особенности образования электрически активных комплексов при термообработке, пластической деформации, облучении и (или) их совместных (комбинированных) воздействиях. Проанализированы дозовые зависимости скоростей образования вакансионных и междоузельных комплексов, и определено, что при облучении бездислокационного зонного *p*-кремния скорость образования *A*-центров уменьшается, комплексов C_iC_s – возрастает, а *E*-центров – изменяется немонотонно с ростом интегрального потока γ -квантов. Это обусловлено неоднородным распределением фоновых примесей из-за наличия не выявляемых селективным травлением мелких включений и влиянием создаваемых ими внутренних деформационных напряжений, под воздействием которых имеет место пространственное перераспределение участвующих в комплексообразовании вакансий и междоузельных атомов.

Показано, что наличие в кристаллах микродефектов *A*- и *B*-типов, а также не выявляемых селективным травлением мелких включений, которые служат источниками внутренних деформационных напряжений, приводит к уменьшению температуры отжига РД, сосредоточенных в деформированной области кристаллической решетки (*A*-центры, комплексы C_iC_s), и изменению механизма отжига дефектов, находящихся в матрице кристалла (*E*-центры). Степень влияния микродефектов на параметры отжига и процессы перестройки РД определяется концентрацией и размерами ростовых структурных нарушений и составом их примесной атмосферы.

Выявлено, что легирование *p*-кремния цирконием приводит к изменению кинетики накопления и отжига компенсирующих и рекомбинационно активных РД вакансионного и междоузельного типов из-за наличия кластеров переходного металла, создающих деформационные напряжения, и обусловленного ими пространственного перераспределения дефектов и фоновых примесей. При исследовании влияния типа примеси переходного металла IV группы на процессы радиационного дефектообразования в *p*-кремнии установлено, что электрически и рекомбинационно активные РД накапливаются при облучении преимущественно вблизи кластеров примесей титана, циркония или гафния, формируя их примесно-дефектную атмосферу. При этом скорость образования комплексов C_iC_i уменьшается, а комплексов V_iO_i – увеличивается с ростом атомного радиуса примеси, что обусловлено пространственным перераспределением фоновых примесей и подвижных РД из-за изменения величины полей упругих напряжений, создаваемых кластерами переходных

металлов. Установленные закономерности радиационного изменения параметров кремния и слоев на его основе послужили базой для разработки радиационных методов анализа структурного совершенства монокристаллов, эпитаксиальных слоев, а также приборов на их основе. Были предложены способы определения концентрации легирующих и технологических примесей, пассивации поверхности, радиационного регулирования электрических параметров планарных полупроводниковых приборов, параметров областей скопления электрически активных дефектов в объеме полупроводников, толщины нарушенных слоев в пластинах кремния и др., по которым получено 55 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

На основе экспериментально определенных коэффициентов радиационного изменения концентрации, холловской подвижности и времени жизни носителей заряда в кремнии с различной концентрацией легирующих и остаточных примесей были получены эмпирические выражения, описывающие изменение этих характеристик при облучении кремния и слоев на его основе реакторными нейтронами, гамма-квантами, электронами, протонами в широком интервале энергий. Результаты экспериментов, расчетные зависимости основных электрофизических характеристик кремния от дозы облучения и физическое обоснование происходящих процессов вошли в регулярно публиковавшийся в 1968–1990 гг. справочник, являвшийся официальным изданием Министерства электронной промышленности СССР.

Библиографические ссылки

1. Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф. Физика дефектов в облученном кремнии. Минск, 2004. С. 144.
2. Kazakevich L. A., Kuznetsov V. I., Lugakov P. F. Nature of radiation defects with level $E_c - 0,22$ eV in *n*-silicon // Rad. Eff. Let. 1986. V 87, № 4. P. 147–154.
3. Эффективность образования радиационных дефектов в *p*-кремнии, выращенном с использованием магнитного поля / Л. А. Казакевич [и др.] // ФТП. 1993. Т. 27, вып. 10. С. 1680–1683.
4. Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф. Влияние ростовых нарушений структуры на дефектообразование в кремнии при внешних воздействиях // ФТП. 1995. Т. 29, вып. 7. С. 1226–1230.
5. Lugakov P. F, Shusha V V Model recombination of nonequilibrium charge carriers in semiconductors containing inhomogeneities // Phys. Stat. Sol. (a). 1984. V 85, № 1. P. 309–312.

РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ

П. В. Кучинский

Радиационное дефектообразование в монокристаллическом кремнии интенсивно исследовалось выпускником кафедры физики полупроводников П. В. Кучинским. Развитие полупроводниковой электроники стимулировало совершенствование технологии получения кремния с характеристиками, отличными от традиционных. Все более разнообразными становятся условия, в которых должны работать полупроводниковые приборы. Развитие космической техники, ядерных энергетических установок, радиохимических производств, исследовательских комплексов требует создания радиационно стойких полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). В то же время облучение высокоэнергетическими электронами, протонами, нейтронами вошло в технологию изготовления полупроводниковых материалов и приборов.

В связи с этим изучение влияния радиационных повреждений на свойства материала и активных областей приборов в целях создания радиационно стойких приборов и ИС является актуальной задачей. Несмотря на достигнутые успехи в этой области, многие вопросы были изучены недостаточно. Один из них – радиационное дефектообразование в кремнии с высоким уровнем легирования.

Радиационная физика кремния решает три основные задачи: установление свойств и природы центров; управление составом дефектов (радиационная технология); оценка стойкости приборов и поиск путей ее увеличения. Фундаментальный вопрос радиационной физики полупроводниковых материалов – образование и аннигиляция первичных радиационных дефектов (РД), величина пороговой энергии образования первичных дефектов.

Сравнение значений эффективности введения первичных смещений и эффективности введения дефектов при различных видах облучения позволяет заключить, что в кремнии с уровнем легирования $n_0 (p_0) \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ доля аннигилировавших первичных дефектов практически одинакова и составляет $\geq 95 \%$. Анализ кинетических уравнений эффективности введения известных комплексов в зависимости от скорости генерации первичных смещений $dN_d/d\Phi$ позволил сделать заключение о механизме аннигиляции первичных дефектов. Получен вид зависимости скорости введения вакансионных и дивакансионных комплексов от скорости генера-

ции первичных смещений [1]. Установлены экспериментальные зависимости скоростей введения дефектов при облучении кремния гамма-квантами и электронами. Показано, что взаимная аннигиляция первичных дефектов маловероятна. Действительно, в кристаллах, содержащих до 10^{18} см^{-3} неконтролируемых примесей, и при значительно меньших концентрациях первичных дефектов вероятность захвата вакансий и междоузлий остаточными примесями или другими стоками может быть существенной. Определено, что в случае не прямой аннигиляции первичных радиационных дефектов эффективность образования комплексов, включающих вакансию, линейно зависит от скорости генерации первичных смещений, а эффективность образования дивакансионных комплексов – квадратично. Полученные результаты указывают также на то, что в слаболегированном кремнии при $n_0 (p_0) \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ основным является не прямой механизм аннигиляции первичных дефектов.

Важный вопрос радиационной физики полупроводников представляет собой поиск примесей – центров аннигиляции первичных дефектов. Введение таких примесей (электрически неактивных) вызывает рост скорости аннигиляции и увеличение радиационной стойкости приборов. Такие проблемы возникли в СССР, США, а также при разработке и создании большого ускорителя в CERN.

В ряде работ было выявлено, что изоэлектронные примеси (например, германий, олово) в кремнии могут быть эффективными центрами захвата вакансий, генерируемых облучением. Эти результаты положили начало интенсивному изучению влияния изоэлектронных примесей на термическую и радиационную стабильность кремния.

Ожидалось, что атомы германия – эффективные центры аннигиляции первичных дефектов. Обсуждался возможный механизм влияния на процесс аннигиляции дефектов указанных примесей:

- сечение захвата первичных РД у вводимых примесей существенно выше, чем у имеющихся стоков;
- возникновение в результате легирования полей упругих напряжений, формирующих направленный поток аннигиляции первичных дефектов. Важность исследований в этом направлении определялась практической возможностью создания приборов с высокой радиационной стойкостью.

Изучение эффективности введения известных комплексов в кремнии, а также изменения времени жизни неосновных носителей заряда позволило сотрудникам П. В. Кучинскому, В. М. Ломако, И. З. Рутковскому, А. Д. Тарасевичу, Л. Н. Шахлевичу установить, что

легирование германием в диапазоне концентраций $10^{18} - 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ *n*-Si не приводит к изменению эффективности введения дефектов [2]. Полученные результаты позволили заключить, что на начальных потоках облучения (до степени компенсации $K \geq 0,7$) атомы германия практически не влияют на процессы аннигиляции первичных радиационных дефектов в кремнии.

Использование кремния с уровнем легирования вплоть до 10^{20} см^{-3} при создании приборов потребовало исследования эффективности образования радиационных дефектов в широком диапазоне уровней легирования и примесного состава. Изучение радиационного дефектообразования в сильнолегированном кремнии показало, что аннигиляция первичных дефектов в таком материале практически отсутствует. Скорость удаления носителей почти равна скорости введения смещений.

В сильнолегированном кремнии изучены особенности образования и свойства не только изолированных дефектов, но и областей скопления дефектов, их влияние на изменение концентрации свободных носителей заряда, времени жизни носителей. Показано, что в сильнолегированном кремнии области скоплений не обладают потенциальным барьером и характер их влияния на электрофизические свойства материала существенно различается по сравнению со слаболегированным кремнием, как и в случае введения изолированных комплексов (облучение гамма-квантами, низкоэнергетическими электронами); при образовании областей скоплений дефектов (облучение нейтронами) в сильнолегированном кремнии скорость удаления носителей заряда практически равна эффективности введения смещений. В то же время исчезновение потенциального барьера на границе «матрица – область скопления дефектов» в сильнолегированном кремнии приводит к уменьшению эффективности радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда.

Важным вопросом радиационной физики является использование излучений для управления параметрами полупроводниковых приборов. Впервые как альтернатива электронному и протонному облучению была предложена и физически обоснована технология использования альфа-частиц изотопных источников для регулирования параметров полупроводниковых приборов.

Проведено сравнение рассчитанной функции распределения первичных смещений по глубине $L(E, x)$ в кремнии с экспериментальной зависимостью распределения скорости удаления носителей при облучении неколлимированным пучком альфа-частиц с энергией

4,7 МэВ. Анализ результатов изучения распределения скорости удаления носителей по глубине кристалла и радиационного изменения времени жизни неосновных носителей показывает, что при облучении кремния неколлимированным пучком альфа-частиц наблюдается практически однородное введение стабильных РД в области $0,1 \leq x/R \leq 0,8$. Выявлено, что при облучении кремния альфа-частицами с энергией 4,7 МэВ основной вклад в образование дефектов дают атомы с малой энергией отдачи. Соответственно изменение электрофизических свойств материала обусловлено введением изолированных дефектов. Установлено, что энергетический спектр основных РД, вводимых в *n*- и *p*-кремний, практически не отличается от спектра дефектов, вводимых при облучении гамма-квантами, электронами. Определена кинетика накопления дефектов в *n*- и *p*-Si и их термическая стабильность. Экспериментально найдены концентрационные зависимости начальной скорости удаления носителей в *n*- и *p*-кремнии при облучении альфа-частицами. Вычислены экспериментальные зависимости коэффициентов радиационного изменения времени жизни носителей в *n*- и *p*-кремнии от уровня легирования ($10^{14} < n_0(p_0) < 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при облучении альфа-частицами. Анализ изменения рекомбинационных свойств кремния при облучении альфа-частицами также подтверждает определяющее влияние изолированных РД на изменение времени жизни носителей.

Показана возможность управления динамическими и статическими параметрами транзисторов при облучении альфа-частицами изотопных источников. Разработанная технология внедрена в НПО «Альфа» (Рига) в 1985 г. и НИИ «Сапфир» (Москва) – в 1987 г.

Важное место в проводимых исследованиях занимали методические вопросы. Один из них – разработка и создание методики и аппаратуры DLTS-спектроскопии. Помимо «классического» изучения параметров электрически активных центров в полупроводниках (энергетическое положение, сечение захвата носителей, концентрация) эта методика позволила получить интересные результаты при изучении центров с сильным электрон-решеточным взаимодействием.

Для ряда центров в кремнии определены их параметры, энергии активации переходов из одного состояния в другое [3, 4]. При изучении радиационных комплексов в «кислородных» образцах обнаружены повторяющиеся во времени изменения состояний центров в кремнии при их термической перестройке, позволяющие отождествить их с колебательной реакцией [3].

Выявлено, что в образцах, насыщенных кислородом, в интервале 100–200 °С центры с уровнем $E_c - 0,18$ эВ ($E1$) перестраиваются в дефекты с уровнем $E_c - 0,34$ эВ ($E2$). При $T > 200$ °С наблюдается обратная перестройка $E2 \rightarrow E1$. Причем процесс перестройки идет с сохранением полного числа дефектов до 300 °С. Поскольку в кристалле всегда есть большое количество стоков для компонентов отжигающихся дефектов, процесс полной взаимной перестройки вероятнее связать с изменением конфигурации дефектов, а не с их отжигом.

Для более детального изучения наблюдаемой перестройки проводился изотермический отжиг образцов при нескольких температурах. Для исключения влияния распада комплексов, наблюдаемого при больших временах отжига, концентрации центров $E1$ и $E2$ нормированы на их суммарную концентрацию для текущего времени отжига.

В течение первых ~ 5 с происходит полное исчезновение дефектов $E1$, сопровождающееся появлением в такой же концентрации дефектов $E2$. В дальнейшем процесс идет в обратном направлении: центры $E2$ исчезают, а вместо них появляются дефекты $E1$. Таким образом, концентрация дефектов с уровнем $E_c - 0,18$ эВ испытывает полный цикл колебаний (появление – исчезновение – появление). Возможность наблюдения поведения системы дефектов во времени при $t > 10^6$ с ограничена термическим распадом А-центра. Попытки исследования колебательного режима перестройки дефектов при более низкой температуре показали, что время перехода системы дефектов из одного состояния в другое возрастает на несколько порядков, что делает проведение такого эксперимента нереальным.

Для описания наблюдаемого поведения дефектов $E1$ и $E2$ во времени использована модель, предложенная в работе [4].

Захват комплексом ($V - O$) подвижного компонента M приводит к структурной перестройке центра через промежуточное состояние ($V - M - O$) в состояние ($V - O$)*, дающее в запрещенной зоне уровень $E_c - 0,34$ эВ. Эта структурная перестройка сопровождается высвобождением компонента M . В дальнейшем идет перестройка ($V - O$)* \rightarrow ($V - O$). Существенным для возникновения колебаний в данной схеме является связывание компонента M комплексом ($V - O$) с последующим его высвобождением.

Предложенная модель реакции подобна колебательной окислительно-восстановительной или ферментативной реакциям, проис-

ходящим в жидких растворах. В данном случае, как и в указанных примерах, имеют место нелинейность кинетики и наличие обратной связи, которые являются необходимыми условиями возникновения колебаний концентраций взаимодействующих компонентов во времени. Время перестройки $E1 \rightarrow E2$ составляет ~ 5 с, а обратного процесса – $E2 \rightarrow E1 - 10^6$ с. Это указывает на существенное возрастание «периода» колебаний.

Такая ситуация может реализоваться, поскольку период колебаний зависит от скоростей поступления взаимодействующих компонентов. В данном случае, например, можно предположить изменение скорости поступления дефекта M в результате истощения его источника.

Изучение кинетики перестройки (в предположении реакции первого порядка) позволило оценить энергию активации процесса перехода, которая составляет 0,7 эВ. В первом приближении энергию активации трансформации $E1 \rightarrow E2$ можно связать с энергией миграции дефекта M . Сравнение полученного значения для энергии активации процесса перестройки с данными для энергии миграции собственных междоузельных атомов (0,85 эВ) и атомов углерода (0,80 эВ) в кремнии дает удовлетворительное совпадение. Это позволяет предположить, что в данном случае подвижным дефектом M , приводящим к колебательной реакции взаимодействия дефектов, могут быть атомы углерода или собственные междоузельные атомы кремния.

Следовательно, в образцах с большим содержанием кислорода обнаружена колебательная реакция перестройки дефектов с уровнем $E_c - 0,18$ эВ в дефект с уровнем $E_c - 0,34$ эВ. Предложена модель такого процесса с участием А-центра. Экспериментально показана возможность существования колебательной реакции взаимодействия дефектов в полупроводниках. В рамках колебательных реакций в ряде случаев могут быть объяснены имеющиеся в литературе результаты по дообразованию («отрицательному» отжигу) и перестройкам дефектов в полупроводниках.

В связи с насущной потребностью информационных технологий в генерировании случайных последовательностей с помощью физических источников выполнен цикл работ по изучению процессов лавинного умножения в сильнолегированных $p-n$ -структурах, изучены статистические свойства флуктуаций лавинного тока, показана возможность управления спектральной плотностью шума при введении радиационных дефектов.

Разработаны требования по созданию диодного генератора шумовых импульсов. Совместно с НПО «Интеграл» выполнена опытно-конструкторская работа по созданию такого прибора. Разработано и передано стендовое оборудование и программное обеспечение для проведения испытаний приборов. В Республике Беларусь освоено производство данного класса приборов.

Библиографические ссылки

1. *Kuchinskii P. V., Lomako V. M.* On the mechanism of primary radiation defect annihilation in Si // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1987. V. 102, № 1. P. 653–658.
2. О влиянии германия на образование электрически активных дефектов в кремнии / П. В. Кучинский [и др.] // ФТП. 1988. Т. 22, вып. 4. С. 634–637.
3. *Кучинский П. В., Ломако В. М., Шахлевич Л. Н.* Колебательная реакция перестройки дефектов в кремнии // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45, вып. 7. С. 350–352.
4. *Кучинский П. В., Ломако В. М., Шахлевич Л. Н.* Конфигурационно-бистабильные дефекты в кремнии // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43, вып. 9. С. 423–425.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРЕМНИЯ

А. К. Федотов

В изучении электрических свойств поликремния больших успехов достигла научная группа профессора Александра Кирилловича Федотова: Н. А. Дроздов, Ю. М. Ильяшук, А. В. Мазаник и др.

Поликристаллический кремний (поли-Si) является основным материалом современной фотовольтаики. Он содержит как точечные дефекты, так и значительное количество крупномасштабных дефектов (КМД) – границ зерен (ГЗ), дислокаций и разного рода преципитатов (оксиды, нитриды). Поскольку КМД в значительной мере определяют свойства поли-Si, начиная с 1980-х гг. на кафедре физики полупроводников было проведено большое количество исследований по их изучению.

Существенное значение для понимания формирования электрической активности реальных ГЗ в поликристаллах кремния имели работы [1, 2], выполненные на кристаллографически аттестованных одиночных границах зерен в крупнозернистом поли-Si, выращенном различными способами. Исследования выделенных

(одиночных) ГЗ к тому времени в основном были выполнены на бикристаллах германия и кремния. Эти работы позволили установить основные различия в электрической активности границ наклона, образуемых в бикристаллах при выращивании из двойной затравки, и в реальных поликристаллах кремния, используемых для создания солнечных элементов (СЭ). В результате проведенных исследований была разработана классификация ГЗ в поли-Si, основанная на взаимосвязи их атомной структуры и электрической активности.

В настоящее время для описания структуры «ядра» ГЗ используется преимущественно концепция решетки совпадающих узлов (PCY), формируемой на плоскости сопряжения двух соседствующих зерен. Последние имеют одну и ту же кристаллическую решетку, но развернуты относительно друг друга на некоторый угол θ_T . Именно поэтому современная структурная классификация ГЗ основана на понятии разориентации кристаллитов. Последняя определяется как по характеру и оси поворота зерен друг относительно друга, так и по углу θ_T этого поворота. Согласно современной классификации, с точки зрения углов поворота и соответственно атомной структуры все границы делятся на два типа – специальные и неспециальные.

По классификации, принятой в работах А. К. Федотова, Е. А. Каца, Ю. М. Ильяшука, А. Е. Артемьева и др., промежуточное положение между специальными и случайными ГЗ занимают границы, которые слабо отклонены от специальных ориентаций (не более 2°), но зачастую обладают достаточно высокой электрической активностью.

Исходя из современных представлений, высокая электрическая активность неспециальных ГЗ в поли-Si может быть обусловлена двумя основными причинами. Одна из них – формирование оборванных связей при нарушении периодичности PCY. Другой причиной высокой электрической активности неспециальных либо слабо отклоненных ГЗ является геттерирование ими фоновых примесей (в основном кислорода и углерода), что может приводить к формированию (на границах зерен) оксидов и карбидов, а также более сложных дефектно-примесных комплексов. Такой вид активности ГЗ называется *наведенной (индуцированной) или несобственной активностью*, которая также проявляется в виде нелинейных поперечных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и прерывистого рекомбинационного контраста. При наличии собственных дефектов у преципитатов (например, в оксиде кремния) на ГЗ последние обнаруживают долговременные релаксации поперечной проводимости [3]. В случае геттерирования примесей на ГЗ одним из видов проявления несобственной активности ГЗ к основным носителям заряда

(ОНЗ) является их высокая продольная проводимость, которая легко обнаруживается при пониженных температурах.

В соответствии с разработанной моделью специальные ГЗ, вследствие отсутствия у них оборванных связей, не проявляют электрической активности ни к ОНЗ, ни к неосновным носителям заряда (ННЗ). При наличии на них преципитатов возможно появление прерывистого, или *точечного*, рекомбинационного контраста.

У границ, слабо отклоненных от специальных ориентаций, могут сосуществовать как участки с РСУ, так и участки с оборванными связями. Согласно разработанной классификации, этот тип ГЗ также должен обнаруживать прерывистый рекомбинационный контраст, но проявлять слабую активность к ОНЗ (слабо нелинейные поперечные ВАХ) вследствие несплошности зернограничного барьера (наличия в нем «проколов»).

Тип возникающих ГЗ и их электрическая активность зависят как от технологии выращивания, так и от тепловой предистории пластин из поли-Si (в первую очередь температуры, длительности и среды термообработки). Как показано в работах А. К. Федотова, Е. А. Каца, Ю. М. Ильяшука, А. Е. Артемьева и др., неспециальные (наиболее активные) ГЗ спонтанно зарождаются на фронте кристаллизации, тогда как специальные и слабо отклоненные границы возникают чаще всего путем отщепления от неспециальных на стадии охлаждения поликристалла. Вследствие этого у слабо отклоненных границ чаще всего проявляется собственная активность, а у зарожденных на фронте кристаллизации случайных границ преобладает наведенный механизм электрической активности.

Появление преципитатов на ГЗ чаще всего характерно для профилированного поли-Si, выращиваемого способом Степанова или методом EFG, в которых используются графитовые формообразователи и относительно невысокий вакуум.

В подавляющем числе применений поли-Si (в особенности при создании солнечных элементов) одной из основных задач является разработка способов подавления электрической активности КМД. Рассмотрим кратко результаты наших исследований в этой области.

Были детально изучены поперечные ВАХ, температурная зависимость равновесной проводимости ГЗ и распределение тока, индуцированного электронным лучом (ТИЭЛ) в их окрестности. Как показали эксперименты, выполненные А. К. Федотовым, Н. А. Дроздовым, Е. А. Кацом, Ю. М. Ильяшуком, А. В. Мазаником, А. Г. Уляшиным [4], внутриверенные дислокации, а также специальные и слабо отклоненные ГЗ после отжига лент проявляют более низ-

кую рекомбинационную активность, чем в исходных образцах. В то же время рекомбинационная активность сильно отклоненных ГЗ после отжига, наоборот, увеличивалась. Это демонстрируют результаты измерения наведенного тока в режиме ТИЭЛ в окрестности ГЗ общего типа. Отжиг вызывает уменьшение рекомбинационной активности внутризеренных дефектов, в то время как активность самой границы возрастает.

Измерение поперечных ВАХ при комнатной температуре показало их линейность для слабо отклоненных ГЗ в исходных и в отожженных в вакууме образцах. При этом, однако, величина поперечной проводимости участков лент, содержащих одиночные ГЗ, в несколько раз меньше по сравнению с участками, не содержащими границы. Это коррелирует с приведенными ранее результатами исследований таких границ, в соответствии с которыми потенциальный барьер на них неоднороден и содержит безбарьерные участки («проколы»), прозрачные для ОНЗ. Заметим, что поперечная проводимость ГЗ в отожженных образцах приблизительно на порядок превышает проводимость аналогичных границ в контрольных (неотожженных) образцах. Это находится в согласии с упомянутым выше уменьшением активности слабо отклоненных границ и внутризеренных дислокаций после отжига. Отметим также, что проведение вакуумного отжига при 1100 °С в течение 2 ч приводило к некоторому увеличению проводимости (вследствие уменьшения дефектности) участков лент, не содержащих границы зерен.

Из проведенных исследований [5, 6] ГЗ в режиме тока, индуцированного световым лучом, следует, что введение в образцы профилированного кремния водорода из плазменного источника приводит к снижению фотоотклика, генерируемого границей, для большинства ГЗ, свидетельствуя об их пассивации. Однако при одинаковых условиях гидрогенизации относительное снижение электрической активности границ в неотожженных образцах заметно выше, что обусловлено их изначально большей дефектностью. Наши исследования показали, что гидрогенизация, проведенная при комнатной температуре, не приводит к заметным изменениям интенсивности фотоотклика. Эффективность гидрогенизации (скорость снижения фотоотклика) резко возрастает с увеличением температуры. Например, увеличение температуры гидрогенизации в два раза (от 100 до 200 °С) вызывает снижение фототока более чем на порядок. При этом гидрогенизация при повышенной температуре приводит к монотонному снижению активности ГЗ с тенденцией к насыщению с увеличением времени обработки.

Одним из спорных в проблеме гидрогенизации электрически активных ГЗ в поли-Si является вопрос о соотношении скоростей диффузии водорода по ним и по объему зерен. Относительно этого вопроса в литературе существуют значительные расхождения: обнаружено, что коэффициент диффузии водорода в поликремнии превышает таковой в монокристаллах, тогда как из работы [5] следует прямо противоположный результат. Особенно большие расхождения замечены при изучении низкотемпературной гидрогенизации (20–100 °С), когда коэффициенты диффузии водорода по ГЗ и в объеме зерен могут очень сильно различаться.

Для объяснения упомянутых расхождений было проведено более детальное изучение временной зависимости электрической активности ГЗ в кристаллах профилированного поли-Si при относительно низкотемпературной (100 °С) гидрогенизации.

Как показали эксперименты, поведение поперечных ВАХ и зависимостей нормированной поперечной проводимости $a(t) = \sigma(t)/\sigma(0)$ от времени гидрогенизации определяется, во-первых, состоянием кристалла (отожженный или неотожженный) и, во-вторых, типом ГЗ (общего типа или слабо отклоненная). При $t < 120$ мин наблюдается рост $a(t)$ для ГЗ обоих типов, причем как в отожженных, так и в неотожженных образцах. Это демонстрирует уменьшение электрической активности ГЗ (понижение высоты барьера) вследствие пассивации ГЗ. При этом наибольший эффект пассивации (наибольшее увеличение $a(t)$) наблюдается для ГЗ общего типа. С другой стороны, для отожженных кристаллов при $t > 120$ мин зависимости $a(t)$ выходят на насыщение, тогда как у неотожженных кристаллов $a(t)$ после достижения максимума уменьшается с ростом t . Необходимо также отметить, что уменьшение значений $a(t)$ для всех ГЗ в исходных образцах сопровождается небольшим (на несколько процентов) уменьшением проводимости зерен.

Разработанная модель Федотова иллюстрирует влияние вводимого в поликристалл при относительно низких температурах атомарного водорода на распределение глубоких центров на ГЗ и мелких акцепторов в области пространственного заряда (ОПЗ), его распределение в окрестности границы, а также распределение зарядов вблизи ГЗ и зонную диаграмму границы. Эта модель качественно объясняет зависимость проводимости границ зерен в профилированном кремнии от длительности гидрогенизации на основе представлений о сосуществовании в ходе водородной обработки двух параллельных процессов — пассивации глубоких центров в «ядре» границы и акцепторов в его окрестности, которые противоположно влияют на проявляемые границей электрические свойства.

В соответствии с данной моделью для относительно малых времен гидрогенизации (в нашем случае до 100 мин) водород диффундирует преимущественно вдоль «ядра» ГЗ в глубь образца, приводя к пассивации зернограничных дефектов, и существенно слабее мигрирует в глубь зерен с поверхности. Это приводит к формированию тонкого высокоомного слоя вблизи поверхности кристалла вследствие нейтрализации атомов бора, уменьшению плотности пограничного заряда и сужению ОПЗ вокруг ГЗ, уменьшению изгиба зон ϕ_b (высоты потенциального барьера) в окрестности ГЗ и, соответственно, увеличению равновесной поперечной проводимости. Очевидно, что процесс пассивации зернограничных дефектов с течением времени будет достигать своего насыщения вследствие конечности их концентрации, а также вероятного разрыва атомами водорода деформированных межатомных связей на ГЗ (это подтверждается результатами ТИСЛ-экспериментов). В результате при достаточном накоплении водорода в «ядре» ГЗ начинает проявляться его миграция из «ядра» в объем зерен за счет существующего градиента концентрации и электрического поля ОПЗ, нормальных к плоскости границы. Эта миграция и будет приводить к дополнительной (по отношению к поверхностной) нейтрализации мелких акцепторов в окрестности, расширению ОПЗ и увеличению высоты потенциального барьера ϕ_b . Именно вследствие этого процесса при достаточно длительных временах гидрогенизации (свыше 100 мин) мы и наблюдаем снижение поперечной проводимости ГЗ или ее насыщение в зависимости от значения коэффициента диффузии водорода в объеме зерен.

Библиографические ссылки

1. Grain boundary structure and electrical activity in shaped silicon / A. Fedotov [et al.] // Journal of Crystal Growth. 1990. V. 104. P. 186–190.
2. Electrical activity of grain boundaries in shaped grown silicon / A. Fedotov [et al.] // Phys. Stat. Sol. (a). 1990. V. 119. P. 523–534.
3. *Ильяшук Ю. М., Федотов А. К.* Релаксация заряда в кремнии на границах зерен, обогащенных кислородом и углеродом // ФТП. 1995. Т. 29, вып. 3. С. 532–535.
4. Transformation of electrical activity of extended defects in silicon polycrystals under annealing and hydrogen plasma treatment / A. Fedotov [et al.] // Phys. Stat. Sol. (a). 1999. V. 171. P. 353–363.
5. *Fedotov A., Mazanik A., Katz E.* Modification of electrical activity of grain boundaries in EFG silicon under influence of hydrogen plasma // Interface science. 2001. V. 9. P. 169–173.

6. Fedotov A., Mazanik A., Ulyashin A. Electrical activity of grain boundaries in silicon bicrystals and its modification by hydrogen plasma treatment // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2002. V 72. P. 589–595.

ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ В КРЕМНИИ

А. Р. Челядинский

Под руководством А. Р. Челядинского помимо методик исследования конкретных дефектных центров развивались и интегральные методы: рентгенодифракционные, электронной дифракции и микроскопии.

В оценке общей нарушенности кристалла рентгеновские методы существенно чувствительнее метода обратного рассеяния ионов. Исследования интерференции рентгеновских лучей, дифрагированных на имплантированном слое, позволяют построить профили распределения радиационных дефектов по глубине без разрушения слоя внедрения.

Предложен метод компьютерного моделирования профиля нарушений и компьютерного сопоставления рассчитанных кривых дифракции с экспериментальными кривыми до их совпадения [1].

Рентгеноструктурным методам не присущи ограничения, связанные с зарядовым состоянием дефектов, с концентрационными эффектами. Чувствительность метода достаточна для изучения структуры внедренных слоев монокристаллов в диапазоне обычно используемых доз имплантированных ионов.

Экспериментально регистрируемое методом двухкристалльного рентгеновского спектрометра изменение периода решетки (ПР) монокристалла позволило исследовать накопление и отжиг радиационных дефектов в имплантированном кремнии. В кремнии при имплантации легких ионов (В, Li) и ионов средних масс (Si^+ , P^+) линейный характер изменения периода решетки с дозой (Φ) связан с накоплением изолированных областей скоплений дефектов.

С ростом дозы ионов двойное перекрытие областей скоплений дефектов (ОСД) ведет к сублинейному характеру изменения ПР(Φ), что обусловлено повышением аннигиляционных процессов. В случае ионов средних масс при трехкратном перекрытии ОСД концентрация дефектов достигает критического значения и имеет место аморфизация слоя внедрения. На основе экспериментальных данных

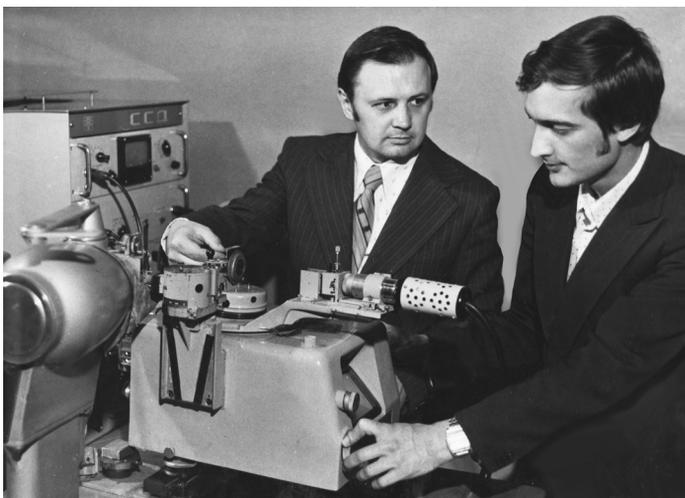


А. Р. Челядинский и аспирант из Германии Гисберт Хельцер за обсуждением диссертационных исследований. 1982 г.

для всякой дозы определяются относительные объемы, занимаемые непокрытыми и n -кратно покрытыми ОСД. При имплантации (ускоритель ионов «Везувий») ионов бора сканирующим пучком с эффективной плотностью тока порядка $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ (но не выше плотности тока начала разогрева слоя внедрения $5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$) аморфизация наступает при 5-кратном перекрытии ОСД. При низкой плотности тока ионов ($0,05 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$) аморфизация не достигается вплоть до дозы 10^{16} см^{-2} . Восстановление при изохронном отжиге ПР кремния, облученного ионами кремния и реакторными нейтронами, протекает на двух стадиях. Первая стадия обусловлена отжигом дивакансий. Увеличение ПР кремния дивакансиями доказано исследованиями комплексообразования дивакансий с атомами Li^+ . На второй стадии отжигаются многовакансионные комплексы.

Примеси P, Sb, As входят в состав многовакансионных комплексов и повышают температуру их отжига на 100°C . Для кремния, имплантированного ионами B^+ , характерна высокотемпературная стадия $700\text{--}900^\circ\text{C}$. С увеличением дозы ионов B^+ концентрация этих дефектов растет по квадратичному закону.

Концентрации идентифицированных методом ЭПР устойчивых собственных междоузельных комплексов типа Si-P6, Si-B3, Si-A5, Si-O2 были на два-три порядка ниже концентраций дивакансий.



А. Р. Челядинский и Н. И. Бережнов проводят рентгеноструктурные исследования имплантированного кремния. 1982 г.

В радиационной физике кремния сложился и долгое время существовал «вакансионный» период. Использование эффекта Воткинса вытеснения атомов бора из узлов решетки междуузельными атомами кремния в процессе изохронного отжига кремния, сильно легированного бором ($\rho_0 = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и облученного различными ионами, позволило установить, что в кремний при облучении легкими ионами и ионами средних масс вводятся два типа устойчивых междуузельных комплексов в концентрациях, сравнимых с концентрациями дивакансий. В положительном зарядовом состоянии это Si–P6 и Si–B3 парамагнитные центры, отжигающиеся при 120 и 480 °С. В нейтральном зарядовом состоянии эти же дефекты проявляются как парамагнитные центры Si–A5 и Si–O2 с температурами отжига 160 и 560 °С соответственно. Установлено, что при термообработке междуузельный комплекс в положительном зарядовом состоянии Si–P6 перестраивается в комплекс Si–B3. Этот же комплекс в нейтральном зарядовом состоянии (Si–A5) при термообработке распадается с освобождением атомов Si [2].

Реализация этих экспериментов требует сохранения атомов бора в узлах в процессе имплантации. Было определено, что эффективность вытеснения атомов В из узлов атомами Si при имплантации зависит от уровня ионизации в слое внедрения и при плотности тока сканирующего ионного пучка $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ и более процесс замещения подавляется и может реализовываться при последующей термообработке.

С эффектом Воткинса тесно связан вопрос подвижности изолированных междоузельных атомов Si. Вытеснение примесей III группы из узлов решетки кремния мигрирующими по кристаллу междоузельными атомами Si наблюдалось при 4,2 К и затем 1,6 и 0,5 К. В радиационной физике возникло представление об атермической миграции междоузельного атома Si в решетке кремния.

В отличие от модели Бургуэна в модели, разработанной Н. И. Бережновым, А. Р. Челядинским, М. Джаданом и Ю. Р. Супрун-Белевичем [3], причина атермической миграции заложена не в высокой подвижности атомов Si, а в примесях замещения. По этой модели из узлов решетки вытесняются все примеси замещения с ковалентными радиусами, отличными от радиуса атома решетки как в большую, так и в меньшую сторону. Междоузельный атом Si движется в поле упругих деформаций, создаваемых примесными атомами. Определены размеры сфер вокруг атомов замещения, попадая в которые междоузельный атом Si движется направленно к центру искажения, в том числе и при гелиевых температурах [4]. В отсутствие атомов примесей, деформирующих решетку, междоузельные атомы Si могут быть неподвижными и накапливаться в кремнии, облучаемом высокоэнергетичными частицами при низких температурах.

Взаимодействие радиационных дефектов с примесями проявляется в значительной мере в диффузии примесей в имплантированном кремнии.

Диффузия имплантированных в кремний бора и фосфора изучалась при различных температурах и длительностях быстрой термообработки (БТО) лампового и термоотжига в печи с различными концентрациями радиационных дефектов в слое внедрения (дополнительное облучение ионами Si^+) и дополнительном введении в слой примесей Ge или C, являющихся ловушками для междоузельных атомов Si через эффект Воткинса. Наиболее эффективными ловушками эти примеси являются при расположении в узлах решетки. Показано, что в зависимости от плотности тока имплантации атомы C могут локализовываться по узлам от 0 до 100 % непосредственно при ионном внедрении. Установлено [5], что ускоренная диффузия имплантированного фосфора (при 900 °С эффективный коэффициент диффузии превышает собственное значение в 1000 раз) протекает по комплексу «междоузельный атом фосфора – междоузельный атом кремния» (PI), где они расположены в одном междоузлии и не соединены между собой ковалентной связью, определяемой потенциальным рельефом кристалла. Интересен установленный факт независимости коэффициента диффузии имплантированного фосфора от температуры БТО при совпадении энергий активации

диффузии комплекса и его развала. Экспоненциальный рост коэффициента диффузии комплекса PI с температурой компенсируется экспоненциальным падением времени жизни этого комплекса.

Аналогичные исследования по диффузии бора позволили заключить, что его ускоренная диффузия при БТО обусловлена перераспределением бора в «быстрый» междоузельный канал диффузии через эффект Воткинса. С течением времени, вследствие истощения концентрации избыточных атомов Si , атомы B захватываются на избыточные вакансии и коэффициент диффузии B падает ниже собственного значения. Восстановление равновесного распределения бора по узлам и междоузлиям достигается при длительностях термоотжига порядка 1 ч. Из полученных результатов можно сделать вывод, что существует возможность значительного снижения коэффициентов диффузии имплантированных бора и фосфора путем дополнительного внедрения в слой кремния электрически нейтральных примесей с ковалентными радиусами, отличными от радиуса атома решетки, что важно при переходе к субмикронной электронике.

Важной задачей полупроводникового материаловедения является обеспечение высокого кристаллического совершенства кремния. Ионное внедрение служит мощным источником радиационных дефектов. В процессе термообработки имплантированных структур кремния, необходимой для отжига радиационных дефектов и электрической активации (перевода в узлы решетки) внедренной примеси, часть точечных дефектов отжигается, часть перестраивается в протяженные нарушения междоузельного типа: стержнеобразные дефекты, дефекты упаковки, дислокационные петли. Эти дефекты имеют глубокие уровни энергии в запрещенной зоне и являются генерационно-рекомбинационными центрами, тем самым ухудшая параметры полупроводниковых приборов: увеличивают обратные токи $p-n$ -переходов, снижают коэффициенты усиления транзисторов и процент выхода годных изделий.

Возникновение остаточных нарушений носит пороговый характер. Для ионов бора с энергиями 100–200 кэВ критическая доза — $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При дозе ионов B^+ $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для получения бездислокационных слоев кремния необходимы 10 шагов имплантации и промежуточных отжигов, что не может быть приемлемым для практического использования. Для уменьшения числа операций в работе сотрудников кафедры и ОАО «Интеграл» В. И. Плебановича, А. И. Белоуса, А. Р. Челядинского и В. Б. Оджаяева [6] предлагается эффект пороговой дозы совместить с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения, используя явление Воткинса. Внедренная в кремний примесь бора после отжига располагается в узлах решетки и являет-

ся центром аннигиляции междоузельных атомов Si, вводимых при следующих шагах ионного легирования. Условие положительного эффекта – сохранение бора в узлах решетки в процессе каждого следующего шага имплантации, что достигается его имплантацией при эффективной плотности тока ионов $1\text{--}2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, обеспечивающей уровень ионизации в слое внедрения, блокирующий процесс замещения по Воткинсу. В этом методе существенно сокращено число шагов имплантации и отжига по сравнению с обычным пошаговым методом, например, при дозе ионов $\text{B}^+ 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ – с 15 до 4.

Разработанный пошаговый метод апробирован на ОАО «Интеграл». По сравнению с базовой технологией применение данного метода приводит к улучшению параметров активных структур кремния – снижению токов утечки диодов, повышению напряжений пробоя, повышению коэффициента усиления транзисторов и выхода годных изделий.

Помимо пошагового метода известен и другой достаточно эффективный метод подавления образования остаточных нарушений в имплантированном кремнии. В основе этого метода лежит дополнительное легирование слоев кремния углеродом. Атом углерода, как и все другие примеси замещения с отличным от матрицы ковалентным радиусом, является центром аннигиляции для междоузельных атомов Si через эффект Воткинса. Эффективность атома C как центра аннигиляции дефектов может быть больше 1. И это действительно наблюдалось экспериментально. Атом C, вытесненный из узла атомом Si, может затем захватиться на вакансию и снова участвовать в аннигиляции междоузельных атомов кремния.

Очевидно, что более эффективно углерод будет работать в качестве ловушки междоузельных атомов кремния, располагаясь в узлах решетки. Равновесная растворимость углерода по узлам решетки кремния невелика – $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Однако в имплантированных слоях при высоких концентрациях избыточных вакансий его растворимость повышается на несколько порядков величины. Термообработку при этом необходимо проводить импульсными методами. Установлено, что локализация атомов C по узлам и междоузлиям непосредственно при имплантации зависит от уровня ионизации в слое внедрения и может управляться плотностью тока ионного пучка. При плотности тока ионов сканирующего луча $1\text{--}2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ практически весь внедренный углерод располагается в узлах решетки кремния и термообработка для этого не требуется. При двойной ионной имплантации B и C получены бездислокационные слои Si.

Обеспечение химической чистоты структур кремния – важная задача полупроводникового материаловедения. Эффективным

геттером неконтролируемых примесей в Si (Fe, Cu, Ni и др.) служит слой микропористого кремния, создаваемый путем имплантации H^+ либо He^+ и последующих термообработок. Имплантация этих примесей требует использования специального оборудования. Разработан метод создания слоя пористого кремния в качестве геттера путем имплантации ионов Sb^+ – стандартной для микроэлектронного производства примеси [7]. В разработку этого метода внесли вклад сотрудники П. К. Садовский, А. Р. Челябинский, В. Б. Оджаяев, М. И. Тарасик, А. С. Турцевич и Ю. Б. Васильев.

Степень электрической активации имплантированной в кремний Sb^+ дозой $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в результате отжига при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 21 %. Остальная часть примеси, вследствие превышения предела растворимости в кремнии, выпадает в виде включений второй фазы с размерами 10–20 нм. При последующей термообработке при $1220 \text{ }^\circ\text{C}$ длительностью 4 ч вследствие снижения концентрации сурьмы в результате ее диффузии атомы сурьмы покидают области второй фазы, оставляя на их месте пустоты. Время жизни неравновесных носителей заряда в пластинах кремния n – p -типа проводимости со сформированным геттером увеличилось в 3–4 раза.

Эффект геттерирования был апробирован на приборных структурах. Исследовались серийные ИМС на биполярных транзисторах. Перед формированием приборов половина пластины кремния имплантировалась в нерабочую сторону ионами Sb^+ с энергией 60 кэВ дозой $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, другая половина пластины оставалась неимплантированной. Пластины прошли термообработку для формирования геттерного слоя. Затем на этих структурах были созданы серийные ИМС на биполярных транзисторах. Результаты электрических измерений говорят о том, что на ИМС, расположенных на пластинах с геттером, значение коэффициента усиления транзисторов на 20–25 % выше значений, полученных на транзисторах, расположенных на пластинах без геттерного слоя.

Библиографические ссылки

1. Tkachev V. D., Holzer G., Chelyadinskii A. R. Damage profiles in ion implanted silicon // *Phys. Stat. Sol. (b)*. 1984. № 1. P. 43–46.
2. Вавилов В. С., Челябинский А. Р. Ионная имплантация примесей в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения // *Успехи физ. наук*. 1995. № 3. С. 347–358.
3. On the problem of Watkins substitution and migration of silicon atoms in silicon / N. I. Berezhnov [et al.] // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*. 1993. V 73, iss. 3. P. 357–363.

4. Челядинский А. Р., Комаров Ф. Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173, № 8. С. 813–846.
5. Chelyadinskii A. R., Taher H. I. H. Diffusion of ion-implanted phosphorus in silicon // Phys. Stat. Sol. (a). 1994. V. 142, № 2. P. 331–338.
6. Создание бездислокационных ионно-легированных слоев кремния / В. И. Плебанович [и др.] // ФТТ. 2008. Т. 50, вып. 8. С. 1378–1382.
7. Создание геттера в кремнии путем имплантации ионов сурьмы / П. К. Садовский [и др.] // ФТТ. 2013. Т. 55, вып. 6. С. 1071–1079.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ

М. И. Тарасик

В научной группе доцента А. М. Янченко с сотрудниками М. И. Тарасик, С. Н. Якубеной, Д. С. Шварковым, А. Н. Петлицким был разработан уникальный бесконтактный СВЧ-фазовый метод измерения времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) τ в полупроводниковых материалах и структурах, характеризующийся высокой чувствительностью и точностью в широком диапазоне измерений [1, 2]. Этим методом проводились измерения τ в исходных, термообработанных, облученных ядерными частицами, после технологических операций полупроводниковых кристаллах, а также определялась зависимость времени жизни ННЗ от температуры и одноосного сжатия.

Впервые выявлено осциллирующее распределение рекомбинационных центров по глубине облученных областей кремния, имплан-



Слева направо: А. М. Янченко, аспиранты Д. С. Шварков и С. Н. Якубена, старший научный сотрудник М. И. Тарасик. 1988 г.

тированного высокоэнергетическими ионами, которое объясняется с учетом процессов, протекающих в результате ядерных неупругих взаимодействий [3].

Установлено также, что пространственное распределение τ по кремниевой пластине, измеряемое бесконтактным СВЧ-методом, определяется расположением свирл-дефектов в подложках, однако его абсолютная величина зависит от времени выдержки подложки на воздухе. При этом значения τ наиболее близки к объемному на подложках с минимальным временем хранения на воздухе после полировки.

При помощи бесконтактного неразрушающего СВЧ-метода измерения τ ННЗ изучалось изменение плотности дефектов в кремниевых пластинках после термообработок при $T = 1000$ °С по диаметру и длине слитка в зависимости от таких исходных характеристик кремния, как концентрация кислорода, термоистория кремния и исходные значения τ . Определенные значения времени жизни находились в диапазоне от 250 мкс в исходном кремнии до 1 мкс в термообработанном [4].

Библиографические ссылки

1. Устройство для бесконтактного измерения параметров полупроводников : пат. 995029 Респ. Беларусь: МПК G01R 31/26 / В. Ф. Стельмах, А. М. Янченко ; дата публ.: 07.02.1983.
2. Исследование времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии фазовым методом / Ю. И. Сидоров [и др.] // Электронная техника. 1989. Сер.: Материалы. №1, С. 21–23.
3. Якубенья С. Н. Влияние радиационного и термического воздействий на рекомбинационные свойства кислородосодержащего кремния. Минск, 1990.
4. Формирование воспроизводимого внутреннего геттера в кремнии / А. Н. Петлицкий [и др.] // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1997. № 5. С. 50.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ В ОБЛУЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

П. В. Жуковский

Использование электронографического метода изучения структуры кристалла с одновременной его имплантацией при различных температурах позволило получить оригинальные результаты по вкладу различных радиационных дефектов в аморфизацию кремния. Было изготовлено устройство для измерения коэффициента отражения

света от поверхности полупроводников. Разработанное устройство позволяло проводить измерения *in situ* в диапазоне от температуры жидкого азота LNT до 300 °С. Во время измерений с помощью этого устройства удалось впервые наблюдать явление самовосстановления структуры имплантируемых полупроводников Si и CdTe, суть которого заключалась в том, что в некотором интервале температур степень дефектности возрастала до определенного уровня, затем наблюдалось ее уменьшение, а после достижения минимума происходил ее дальнейший рост. Такие колебания степени дефектности в зависимости от типа полупроводника и вида имплантируемых ионов могли повторяться от одного до нескольких (максимально до 5) раз. Обнаружение этого явления и его объяснение с использованием механизма прыжкового обмена зарядами между амфотерными дефектами, вносящими глубокие уровни в запрещенную зону, привели к расширению тематики проводимых исследований. В результате впервые был выявлен термически активированный рост диэлектрической проницаемости сильнодефектных полупроводников, таких как CdTe с переходными металлами, а также облученных большими дозами нейтронов Si и GaAs. Установлено также, что облученный нейтронами кремний является сегнетоэлектриком с двумя температурами Кюри, нижней около 315 К и верхней около 420 К. Разработана модель этого явления, суть которой заключается в образовании диполей в результате прыжкового обмена зарядами, что и приводит к дополнительной поляризации. Поскольку частота прыжков экспоненциально зависит от температуры, то и дополнительная поляризация является термически активированной.

Проводились также работы по модификации и изучению свойств соединений A^2B^6 и кремния. Целью исследований ионно-имплантируемого кремния была замена облучения нейтронами на ионы и получение с их помощью слоев с повышенной диэлектрической проницаемостью. Для изучения ионно-имплантированного кремния применили ранее не использовавшуюся схему измерений – конденсатор, в котором роль диэлектрика исполнял имплантированный слой. Одной из обкладок была не поврежденная имплантацией (глубинная) часть подложки с высокой по сравнению с имплантированным слоем проводимостью. Другой обкладкой являлся слой металлизации, нанесенный на имплантированный слой. Анализ результатов измерений показал, что в имплантированных слоях кремния происходит прыжковый перенос зарядов, в результате которого примерно в 10 раз увеличивается низкочастотная диэлектрическая проницаемость кремния. Это явление, в отличие от прыжковой проводимости в кремнии, компенсированном мелкими примесями, наблюдается не при гелиевых, а при значительно более высоких (до 400 К) температурах.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ И ИЗОВАЛЕНТНЫЕ ПРИМЕСИ В КРЕМНИИ

В. С. Просолович

В. Д. Ткачёвым, В. В. Петровым, В. С. Просоловичем, Д. И. Бринкевичем и Ю. Н. Янковским совместно с сотрудниками Государственного научно-исследовательского института редкометаллической промышленности «Гиредмет» (Москва, Российская Федерация) проведен цикл работ по созданию методов выращивания монокристаллического кремния и германия с повышенной радиационной стойкостью и термической стабильностью. В результате впервые разработаны физические основы получения монокристаллического и эпитаксиального кремния, легированного в процессе выращивания редкоземельными и изовалентными примесями, установлены оптимальные виды примесей, их коэффициенты сегрегации и коэффициенты испарения из расплава.



Ю. Н. Янковский —
ведущий научный сотрудник
НИЛ спектроскопии
полупроводников

Установлено, что редкоземельные и изовалентные примеси в расплаве и в твердом растворе кремния служат эффективными внутренними геттерами для технологических фоновых примесей. Разработан и физически обоснован новый метод повышения гомогенности распределения лантаноидов в монокристаллах кремния, включающий облучение быстрыми нейтронами и пострадиационную высокотемпературную обработку.

Впервые показано, что легирование кремния редкоземельными элементами и германием повышает термостабильность материала. Установлено, что повышение радиационной стойкости кремния, легированного лантаноидами, обусловлено не только действием их скоплений как стоков для вакансий, но и взаимодействием РЗЭ с фоновыми технологическими примесями [1, 2].

В сотрудничестве с ОАО «Интеграл» В. С. Просоловичем, Ю. Н. Янковским, Д. И. Бринкевичем проведен цикл работ по формированию слоев и пленок на монокристаллическом кремнии, легированных редкоземельными и изовалентными примесями в целях формирования внутренних геттеров для технологических примесей. Установлено, что легирование редкоземельными примесями эпитаксиальных слоев, выращенных на кремниевых подложках, в процессе выращивания легированных сурьмой, позволяет получать эпитаксиальные слои с пониженной плотностью дефектов, что обуславливает улучшение электрофизических параметров $p-n$ -структур, создаваемых на эпитаксиальных



Д. И. Бринкевич – ведущий научный сотрудник НИЛ спектроскопии полупроводников. 2006 г.

слоях. Впервые определено, что геттерирование фоновых технологических примесей редкоземельными элементами приводит к уменьшению плотности электрически и рекомбинационно активных центров на границе раздела «полупроводник – оксид», что обуславливает снижение напряжения и емкости плоских зон МОП-структур, а также порогового напряжения биполярного транзистора. Показано, что обратные токи $p-n$ -структур, созданных на легированных редкоземельными элементами эпитаксиальных пленках, существенно меньше, а напряжение пробоя на 25 % выше, чем у $p-n$ -структур, сформированных на не легированных редкоземельными элементами эпитаксиальных слоях. При концентрации $N_{P3Э} \sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в наращиваемом на пластинах оксиде кремния обнаружено повышение напряжения пробоя оксида на 15 %. В оксиде кремния атомы редкоземельных элементов являются дополнительными центрами рассеяния для электронов, что определяет повышение напряжения пробоя. Ударная ионизация носителей заряда не регистрируется до напряженности электрического поля $8,5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$ [3–5].

Впервые показано, что дополнительная ионная имплантация редкоземельной примеси приводит к уменьшению изменения об-

ратного тока p - n -структур при облучении высокоэнергетичными электронами ($E = 1-10$ МэВ, $D \leq 5,0 \cdot 10^{16}$ см⁻²), а также к уменьшению изменений порогового напряжения и напряжения плоских зон в МОП-структурах при облучении γ -квантами ⁶⁰Со. Установлено, что наблюдаемое снижение радиационной деградации электрофизических параметров обусловлено действием редкоземельных примесей как стоков для вакансий, образующихся в процессе облучения, а также геттерированием фоновых технологических примесей, участвующих в формировании радиационных дефектов.

Выявлено, что при термическом отжиге монокристаллов кремния, имплантированных редкоземельными элементами и основными легирующими примесями, происходит ускорение процесса диффузии примесей бора и фосфора к поверхности. Данные эффекты обусловлены наличием в приповерхностной области дополнительных каналов для диффузии бора и фосфора по дефектам типа дислокационных петель, возникающим после имплантации редкоземельных элементов и последующего отжига. Разработана феноменологическая модель диффузии редкоземельных элементов в кремнии и структурах на его основе, учитывающая зависимость коэффициента диффузии от концентрации диффундирующей примеси [6].

Определены требования к технологическим условиям выращивания монокристаллического кремния с точки зрения оптимизации условий получения бездефектных монокристаллов с минимальными внутренними упругими напряжениями. Установлена зависимость физико-механических свойств структур SiO₂/Si от технологии наращивания окисла, что позволяет прогнозировать их поведение при механической обработке. Показано, что резкое снижение (ниже значений, характерных для необлученного кремния) микротвердости кремния в приповерхностной области после проведения ионной имплантации и быстрого термического отжига обусловлено разупрочняющим воздействием вакансионных дефектов.

В. С. Просоловичем и Ю. Н. Янковским в сотрудничестве с Институтом точной механики РАН (Москва) решена трехмерная задача по расчету тепловых полей и напряжений в изотропном и анизотропном кристаллах кремния с применением программного комплекса Crystmo/Marc. На основе сопряжения радиационно-кондуктивной модели в Marc и моделей конвекции в Crystmo или Fluent проведен расчет напряжений в кристаллах кремния при выращивании методом Чохральского для оценки возможностей

возникновения критических напряжений, вызывающих пластическую деформацию и генерацию дислокаций. Расчетные значения напряжений не превышают критических. Их максимальное значение (7,6 МПа) достигается на боковой поверхности кристалла вблизи фронта кристаллизации. При удалении от фронта кристаллизации напряжения уменьшаются. Показано, что тепловые условия также оказывают существенное влияние на рекомбинацию собственных точечных дефектов и образование микродефектов в кристалле. По модулю Defects определено распределение микродефектов в кристалле с использованием его тепловой истории, учитывающей изменение скорости его вытягивания из расплава V_p . Микродефекты междоузельного типа (I) сконцентрированы вблизи боковой поверхности, а вакансионные (V) расположены в центре слитка. Форма I/V -границы микродефектов соответствует характеру изменения V_p [7].

Для описания процессов преципитации кислорода и внутреннего геттерирования технологических примесей В. С. Просоловичем, Ю. Н. Янковским, В. Е. Гусаковым на основе классической теории Хэма зарождения преципитатов в пересыщенном твердом растворе примеси разработаны комбинированные методы математического моделирования, основанные на решении нелинейных дифференциальных уравнений Фоккера – Планка для кластеров малых размеров и скоплений определенной формы. Разработана модель, обобщающая теорию Хэма на случай неоднородной по объему преципитации, позволяющая осуществлять технологические процессы преципитации кислорода. Показано, что во время термообработки преципитаты с радиусом меньше некоторого равновесного (критического) радиуса ($r_{кр}$) будут растворяться, в то время как преципитаты с $r > r_{кр}$ будут расти. Установлено, что для создания высокой плотности преципитатов в целях проведения эффективного внутреннего геттерирования материал вначале необходимо подвергнуть отжигу при 600–700 °С, при котором создается высокая плотность преципитатов, а затем высокотемпературному отжигу, при котором происходит их рост.

Разработана математическая модель формирования кислородно-вакансионных преципитатов, показывающая, что при варьировании с помощью БТО содержания вакансий в Si, выращенном методом Чохральского, возможно прецизионно управлять распределением кислородных преципитатов для создания обедненной зоны вблизи поверхности пластин (соответствующей низкой концентрации

вакансий) с одновременным формированием высокой плотности преципитатов в объеме пластин (высокая концентрация вакансий). Показано, что использование БТО для интенсификации процессов преципитации кислорода позволяет исключить зависимость от концентрации кислорода, термической предыстории получения монокристалла и местоположения пластины в монокристалле. Выявлено, что эффективность MDZ способа геттерирования технологических примесей практически не зависит от термического цикла получения приборных структур, что позволяет формировать «чистую» приповерхностную область размером 50–60 мкм с резкой границей, пригодной для создания структур со щелевой изоляцией.

В результате проведения совместных работ с ОАО «Интеграл» В. С. Просоловичем и Ю. Н. Янковским показана возможность формирования ретроградного профиля распределения примеси в легированных областях (карманах) тиристорных структур методом высокоэнергетичной ионной имплантации в целях исключения эффекта «защелки». На основе теоретических исследований произведена разработка режимов ионного внедрения и постимплантационной обработки.

В. Б. Оджаевым, В. С. Просоловичем, Ю. Н. Янковским совместно с сотрудниками ОАО «Интеграл» проведен цикл работ по разработке методов оптимизации эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также методов межоперационной диагностики, установлены факторы, определяющие надежность и стабильность эксплуатационных параметров интегральных микросхем. Показано, что у $n-p-n$ -транзисторов, изготовленных по технологии с применением БТО, отсутствует узкое место на периферии эмиттерного $p-n$ -перехода, глубина залегания базы и эмиттера меньше, чем у транзисторов с профилированной базой, и, как следствие, меньше ширина активной базы. Выявлено, что глубина базы под эмиттером имеет такую же ширину, как и вне его, т. е. отсутствует эффект оттеснения базы эмиттером. Исключение данного эффекта при формировании $n-p-n$ -транзисторов с использованием для отжига ионно-легированных слоев быстрых термических обработок указывает на отсутствие в процессе отжига ускоренной диффузии бора в области под эмиттером.

Установлено, что электрофизические характеристики n -МОП транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний

на границе раздела SiO_2/Si приводит как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора. Это обусловлено появлением дополнительного положительного неподвижного заряда, электронные уровни которого располагаются в объеме диэлектрика, и поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны с временами релаксации от 1 до 10 мкс и вблизи разрешенных зон с временами релаксации от 0,01 до 1 мкс. Данные состояния связаны с присутствием в оксиде ионов щелочных и тяжелых металлов, попадающих в него из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе во время изготовления приборов. Источниками загрязнений могут служить как детали и узлы технологических установок, так и используемые материалы и реактивы [8].

Библиографические ссылки

1. Редкоземельные элементы в монокристаллическом кремнии / Д. И. Бринкевич [и др.]. Новополоцк, 2003.
2. Влияние легирования германием и гадолинием на термостабильность монокристаллического бездислокационного кремния / В. В. Борщевский [и др.] // Высокочистые вещества. 1991. № 4. С. 61–64.
3. Особенности генерации термодоноров в дислокационном кремнии, легированном редкоземельными элементами / А. С. Дутов [и др.] // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1989. Т. 25, № 10. С. 1589–1592.
4. Легирование кремния лантаноидами как способ оптимизации параметров детекторов ионизирующих излучений / Н. П. Афанасьева [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 2. С. 24–26.
5. Эпитаксиальные структуры на основе кремния с добавлением редкоземельных и изовалентных примесей / Д. И. Бринкевич [и др.] // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2002. № 2. С. 37–38.
6. Особенности поведения фосфора в кремнии, предварительно имплантированном иттербием / В. В. Петров [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 1. С. 86–88.
7. Моделирование термонапряженного состояния монокристаллов с учетом анизотропии и пластичности при выращивании методом Чохральского / А. И. Простомолотов, Н. А. Везезуб, В. С. Просолович // Вестн. ТГУ. 2013. Т. 18, вып. 3. С. 55–56.
8. Анализ качества подзатворного диэлектрика МОП-структур по вольт-фарадным характеристикам / В. Б. Оджаев [и др.] // Приборы и методы измерений. 2015. № 1. С. 94–98.

ИОННО-РАДИАЦИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ПОЛИМЕРОВ

В. Н. Попок

Данное направление получило свое развитие на кафедре с начала 1990-х гг. Исследования были инициированы В. Б. Оджаевым в тесном сотрудничестве с коллегами из Чешской Республики, в частности В. Шворчиком (V. Švorčík) и В. Рыбкой (V. Rybka) из Высшей школы химических технологий в Праге (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze), а также В. Гнатовичем (V. Hnatowicz) и Й. Квитком (J. Kvittek) из Института ядерной физики АН Чешской Республики (Ústav jaderné fyziky AV ČR).

В первой половине и середине 1990-х гг. во время обучения в аспирантуре и стажировки в Высшей школе химических технологий в Праге Е. И. Козлова, О. Н. Янковский и В. Н. Попок активно развивали данное направление научных исследований и обеспечивали эффективное сотрудничество между Минском и Прагой. Со стороны БГУ помимо В. Б. Оджаева в исследованиях участвовали И. П. Козлов, И. И. Азарко и И. А. Карпович, а также Д. В. Свиридов (химический факультет).

В результате проведенных работ получен ряд фундаментальных данных, объясняющих изменения структуры и состава различных полимеров, подвергнутых имплантации. Детально исследованы процессы деградации органических материалов под воздействием энергетических ионов, что дало возможность объяснить явления дегазации и карбонизации, а также формирование латентных треков. Были изучены профили распределения вводимых примесей по глубине и отработаны методики, позволяющие декорировать радиационные повреждения. Таким образом, были выработаны методы контроля физических и химических свойств модифицированных слоев полимеров, а также созданы практические подходы к управлению параметрами органических полупроводниковых материалов. На основе полученных результатов были разработаны и запатентованы принципы формирования полимерных электронных элементов, в частности транзисторов, и созданы опытные образцы таких приборов.

Новые функциональные возможности для использования модифицированных полимеров открывает имплантация ионов магнитных металлов, что позволяет формировать не просто проводящую, но и магнитоупорядоченную среду в полимерной матрице.

В 2000-х гг. данная тематика получила дальнейший импульс в рамках развития сотрудничества с Казанским физико-техническим институтом (КФТИ) АН России, в частности с Р. И. Хайбулиным и А. Л. Степановым. Проведение высокодозовой ионной имплантации металлов, осуществленное сотрудниками КФТИ, позволило синтезировать тонкие слои полимеров, содержащие металлические наночастицы. В зависимости от типа внедряемых ионов получаемые нанокomпозиционные материалы демонстрируют уникальные оптические, магнитные и электронные свойства. Например, внедрение наночастиц меди, серебра или золота в диэлектрик ведет к формированию слоев с ярко выраженными свойствами локализованного поверхностного плазмонного резонанса, что позволяет применять данные материалы в оптическом приборостроении, а также как детектирующие элементы сенсоров. В рамках совместных исследований с сотрудниками КФТИ был получен ряд результатов по специфике формирования наночастиц в полимерах, что позволило расширить спектр возможных диэлектрических сред для плазмонных систем. Использование для имплантации таких металлов, как железо, кобальт или никель, позволяет формировать наноструктуры с ферромагнитными или суперпарамагнитными свойствами, которые являются перспективными для магнитных запоминающих устройств. Исследования на кафедре, а также данные, полученные М. Г. Лукашевичем в рамках сотрудничества на базе Рурского университета Бохума, Германия (Ruhr-Universität Bochum), позволили обнаружить ряд интересных фундаментальных явлений в корреляции электронных и магнитных свойств полимерных нанокomпозитов, в частности развить теорию переходов «изолятор – проводник» и связать ее с магнитными свойствами наночастиц.



В. Б. Оджаев —
инициатор исследований
ионно-радиационной
модификации полимеров

По результатам проведенных исследований ионно-имплантированных полимеров опубликовано более 50 научных статей, среди которых несколько обзорных работ [1], а также научная монография [2], учебное пособие [3], главы в книгах [4, 5]. Тематика,

связанная с ионной имплантацией полимеров, стала основой для написания семи диссертаций на соискание степени кандидата физико-математических наук (И. И. Азарко, В. С. Волобуев, И. А. Карпович, Е. И. Козлова, А. А. Харченко, О. Н. Янковский, Нажим Фирас) и частью двух диссертаций на соискание степени доктора физико-математических наук: В. Б. Оджаева и М. Г. Лукашевича. Полученные данные были представлены на международных конференциях и высоко оценены научным сообществом. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования процессов ионной имплантации полимеров используются в учебном процессе кафедры физики полупроводников и наноэлектроники БГУ при чтении лекций по ряду спецкурсов и позволяют повысить уровень подготовки специалистов по физике полупроводников и наноэлектронике.

Библиографические ссылки

1. Correlation of Electronic and Magnetic Properties of Thin Polymer Layers with Cobalt Nanoparticles / A. Kharchenko [et al.] // Particle & Particle Systems Characterization. 2013. V. 30, iss. 2. P. 180–184.
2. Ионная имплантация полимеров / И. П. Козлов [и др.]. Минск, 1998.
3. В. Б. Оджаев, В. Н. Попок, И. И. Азарко. Физика электропроводящих полимеров : курс лекций. Минск, 2000.
4. Sviridov D. V., Odzhaev V. B., Kozlov I. P. Ion-Implanted Polymers // Electrical and Optical Polymers Systems / ed. T. Wise. N. Y. ; Marcel, 1997. P. 387–422.
5. Popok V. N. Compositional and structural alterations of polymers under low-to-medium-energy ion implantation // Surface Science Research / ed. Ch. P. Norris. N. Y., 2005.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Н. М. Казющц

Развитие методов исследований необходимо для получения новых знаний и аналогично «производству средств производства» в сфере науки. Исследования и контроль качества полупроводниковых материалов основаны на экспериментальных методах изме-

рения их параметров. Эти методы, реализованные в физическом практикуме, являются неотъемлемой составляющей образовательного процесса на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники. Руководители кафедры всегда поддерживали разработку новых и совершенствование ранее созданных экспериментальных установок. Залогом успешного развития экспериментального метода исследований был сплоченный коллектив, в состав которого входили талантливые инженеры-электронщики. Созданные на кафедре измерительные установки в значительной степени формировали и объединяли исследователей в коллектив единомышленников. Ниже приведен краткий обзор методов измерения параметров полупроводников и экспериментальных установок, разработанных в разное время сотрудниками кафедры.

Основные параметры полупроводников можно легко определить, изучая явления переноса зарядов в них. В частности, измерение величины электропроводности остается основным методом характеристики полупроводников. На кафедре разработана современная установка для автоматизированных измерений величины и энергии активации электропроводности в полупроводниковых приборных структурах (М. С. Русецкий). Ее прототипом послужила установка для исследования статических параметров полупроводниковых приборов «Фонон-1» лабораторного спецпрактикума (В. И. Курганский). Для получения температурной зависимости электропроводности в установке предусмотрен режим автоматического измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при нагревании образца, на основании которых по заложенному в программе алгоритму рассчитывается величина электропроводности при каждой температуре, а из полученной температурной зависимости вычисляется энергия активации электропроводности.

Среди явлений, связанных с переносом заряда, гальваномагнитные позволяют измерить наиболее важные характеристики полупроводника – тип и концентрацию основных носителей заряда, их подвижность. Гальваномагнитные явления (эффект Холла, магниторезистивный эффект) возникают при совместном действии на полупроводник электрического и магнитного полей и объясняются искривлением траектории носителей заряда (электронов и дырок) под действием силы Лоренца.

Для измерения величины эффекта Холла используют плоские прямоугольные образцы в форме бруска, длина которых приблизительно в 4 раза больше ширины и толщины. Электрическое поле направляют вдоль длинной стороны образца, а магнитное – перпен-

дикулярно электрическому. Тогда под действием магнитного поля электроны (дырки) будут отклоняться к боковой грани образца, а на противоположной грани останется нескомпенсированный заряд ионизированных доноров (акцепторов). Возникает поперечное электрическое поле (холловское электрическое поле), уравнивающее силу Лоренца и направленное перпендикулярно приложенным электрическому и магнитному полям. Полярность холловского поля зависит от знака носителей заряда, что позволяет определить тип проводимости. Измеряемая в эксперименте величина является, как правило, ЭДС Холла, которая связана с концентрацией и подвижностью носителей заряда. Для определения энергии активации электропроводности измеряют зависимость ЭДС Холла от температуры. Этот метод дает достоверные результаты при тщательной обработке данных, что существенно упростилось в связи с использованием компьютеров. В то же время простые измерения температурных зависимостей ЭДС Холла нелегко интерпретировать, если полупроводник частично компенсирован примесями противоположного типа.

Геометрия образца в форме бруска при исследованиях эффекта Холла должна быть тщательно выдержана и все размеры точно измерены. Измерения эффекта Холла методом Ван дер Пау позволяют определять удельное сопротивление и коэффициент Холла в полупроводниковых пластинах произвольной формы, используя четыре точечных контакта на периферии образца. В сочетании с удалением тонкого приповерхностного слоя полупроводника этот метод позволяет выявить распределение носителей заряда и их подвижность по глубине в структурах, полученных с помощью эпитаксии, диффузии или ионного внедрения (Ю. Р. Супрун-Белевич). Удаление тонкого (десятки нм) слоя полупроводника проводят в два этапа. На первом, используя химическое анодирование, формируют слой окисла, толщина которого задается разностью потенциалов между образцом и электролитом. Затем окисел стравливают и повторяют измерения. Толщина удаленного слоя может контролироваться независимо методом эллипсометрии.

Внешнее магнитное поле не только вызывает появление холловского электрического поля, но изменяет также величину тока. Движущийся заряд в твердом теле время от времени отклоняется от заданного электрическим полем направления (рассеивается в кристаллическом поле матрицы, на примесях и дефектах). Под действием только электрического поля заряд движется прямолинейно и между актами рассеяния перемещается на некоторое расстояние (длина свободного пробега). Вследствие искривления траектории

в магнитном поле проекция длины свободного пробега заряда вдоль электрического поля уменьшается, что равносильно уменьшению электропроводности. Таким образом, сопротивление полупроводника в поперечном магнитном поле возрастает (магниторезистивный эффект). Измерение сопротивления полупроводника в магнитном поле позволяет найти подвижность носителей заряда при известном механизме их рассеяния.

Измеряя величину эффекта Холла, невозможно определить параметры уровней дефектов в нижней половине запрещенной зоны для полупроводников *n*-типа и в верхней половине запрещенной зоны для полупроводников *p*-типа. Кроме того, в сильно компенсированных полупроводниках с понижением температуры из-за «вымерзания» носителей заряда наблюдается рост их сопротивления до сотен Ом, что затрудняет измерения. Освещение образца при измерениях эффекта Холла (фотоэффект Холла) различным по интенсивности и спектральному составу светом приводит к увеличению чувствительности и позволяет наблюдать уровни, не проявляющиеся при классических измерениях эффекта Холла (И. П. Козлов).

С использованием гальваномагнитных явлений сотрудниками кафедры впервые была обнаружена и детально исследована прыжковая проводимость по радиационным дефектам в германии (В. П. Доброго, О. П. Ермолаев), установлены закономерности экранирования электростатического поля при прыжковой электропроводности по атомам примеси в компенсированных кристаллических полупроводниках (Н. А. Поклонский). Показано, что учет переходов электронов (дырок) между двумя точечными дефектами кристаллической решетки через третий дефект позволяет количественно описать экспериментально наблюдаемый рост высокочастотной прыжковой электропроводности в полупроводниках при нагревании, а также прыжковое магнитосопротивление на переменном токе (Б. В. Климович, Н. А. Поклонский). Накоплен обширный экспериментальный материал по влиянию радиационных дефектов на электрические и оптические свойства кристаллов кремния (М. Т. Лаппо, П. Ф. Лугаков,



И. П. Козлов — активный исследователь фотоэлектрических эффектов в полупроводниках. 1978 г.



Слева направо: В. В. Петров, М. Т. Лаппо, М. И. Данец – сотрудники лаборатории спектроскопии полупроводников. 1980-е гг.

В. В. Петров), арсенида галлия (В. Ф. Стельмах, Д. С. Доманевский, В. М. Ломако, А. В. Латышев, Т. И. Кольченко) и германия (В. И. Уренёв, А. В. Латышев); установлено влияние атомов кислорода и углерода в кремнии на состав и структуру радиационных дефектов (М. Т. Лаппо). Определены особенности явлений переноса в эпитаксиальных пленках арсенида галлия *n*-типа в классических и квантовых магнитных полях (М. Г. Лукашевич, В. Ф. Стельмах). Установлена природа и структура термодоноров в полупроводниковых материалах (В. В. Литвинов, В. И. Уренёв, Г. В. Пальчик).

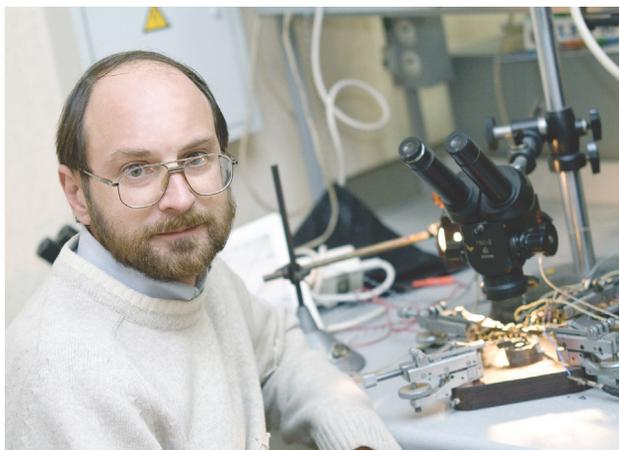
Оптические явления в полупроводниках основаны на взаимодействии электромагнитного излучения с носителями заряда, атомами кристаллической решетки, примесными атомами, электронно-дырочной плазмой. Экспериментально измеряемыми параметрами, характеризующими взаимодействие света с веществом, являются коэффициенты отражения, пропускания, поглощения. Зависимости этих коэффициентов от длины волны различны для разных полупроводников и отражают особенности их зонной структуры, количество и химический состав примесей. Таким образом, регистрируя спектральные зависимости, можно изучать физические процессы в полупроводниках и измерять их важнейшие параметры.

На кафедре получила развитие спектроскопия поглощения инфракрасного (ИК) излучения примесями и дефектами структуры

в полупроводниках. Прежде всего это касается радиационных дефектов и примесей, не проявляющих электрической активности, таких как кислород в кремнии и германии, углерод в кремнии. Введение примесей значительно изменяет динамические свойства кристаллической решетки матрицы. Вступая в связь с атомами кристалла, они совершают колебания относительно положения равновесия. При колебаниях происходит периодическая деформация электронных оболочек примесных атомов. Иначе говоря, индуцируется переменный дипольный момент, обеспечивающий поглощение электромагнитного излучения (фотонов) колебаниями примесного атома (фононами). Частота этих колебаний определяется массой примесных атомов и силой их связи с атомами решетки, т. е. характеризует тип примеси, а величина интегрального поглощения на характеристической частоте пропорциональна концентрации примеси.

С использованием спектроскопии ИК-поглощения сотрудниками кафедры детально исследованы закономерности распределения технологических примесей в кремнии и германии, изучены механизмы формирования и трансформации кислородных термодоноров и радиационных дефектов в этих материалах (М. Т. Лаппо, В. В. Петров, Я. И. Латушко, В. В. Литвинов, В. В. Чёрный). Разработаны методика и установка экспресс-контроля распределения кислорода и легирующих примесей вдоль оси роста слитка кремния, которые внедрены на ОАО «Интеграл» и его филиале – заводе «Камертон», г. Пинск (В. В. Литвинов).

Поглощение ИК-излучения свободными носителями заряда положено в основу экспериментального метода определения концентрации носителей в сильнолегированных полупроводниках (В. А. Самуйлов). Приобретенная за счет поглощения фотонов избыточная кинетическая энергия свободных носителей заряда передается фононам кристаллической решетки, превращается в теплоту. Поскольку спектр состояний в разрешенных зонах квазинепрерывный, свободные носители заряда в зонах могут переходить из одного энергетического состояния в другое, поглощая практически любое малое количество энергии. Поэтому структурных особенностей в спектре поглощения не наблюдается и в первом приближении (модель идеального электронного газа) коэффициент поглощения свободными носителями заряда пропорционален квадрату длины волны. Коэффициент поглощения вычисляют по экспериментальным результатам измерения коэффициентов отражения и пропускания, а концентрацию носителей заряда определяют по калибровочным зависимостям.



М. С. Русецкий – создатель уникальных приборов для изучения электрофизических свойств алмаза. 2010 г.

На кафедре разработана автоматизированная установка для измерения коэффициента пропускания на участке длин волн 200–1100 нм (М. С. Русецкий). Она предназначена для изучения поглощения широкозонными полупроводниками, связанного с взаимодействием фотонов с электронами собственных атомов кристаллической решетки, электронами примесных атомов и дефектов, и позволяет измерять спектры пропускания при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Установка используется как для научных исследований, так и в учебном процессе.

Развитие на кафедре методов регистрации избыточного излучения света над тепловым позволило обнаружить характеристические линии рекомбинационного излучения, связанного с радиационными дефектами и дислокациями в полупроводниках. Для возникновения рекомбинационного излучения необходимо, чтобы система была в неравновесных условиях. Это достигается одной из форм возбуждения (фотонами, электронами, электрическим полем), создающего электронно-дырочные пары.

Последующий переход полупроводника из возбужденного в равновесное состояние происходит через рекомбинацию электронов и дырок. Часть избыточной энергии при рекомбинации может выделяться в виде излучения (излучательная рекомбинация, люминесценция). В спектрах излучательной рекомбинации содержится информация о кристаллической матрице и примесно-дефектном

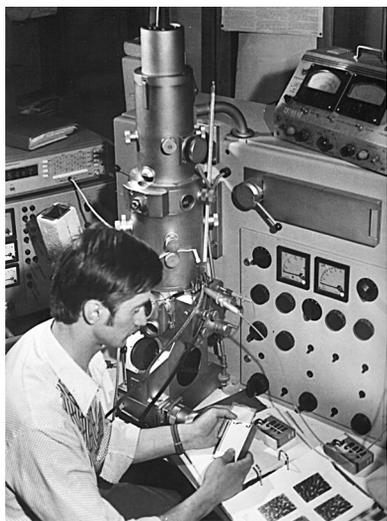


В. А. Суслов (слева) и Н. М. Казюич (справа)
за измерением фото-ЭДС в полупроводниках. 1980 г.

составе полупроводника. В ряде случаев из анализа спектров можно определить концентрацию примесей (дефектов). В сочетании с пьезо- и магнитными воздействиями на полупроводник люминесцентная спектроскопия позволяет определить симметрию и состав центров излучательной рекомбинации. Люминесцентные методы имеют высокую чувствительность и относятся к идеальным методам измерений, так как не разрушают структуру образца и не требуют его специальной подготовки.

Сотрудниками кафедры впервые обнаружена излучательная рекомбинация, связанная с радиационными дефектами в кремнии (А. В. Юхневич, А. В. Мудрый), в германии (В. А. Быковский) и арсениде галлия (Д. С. Доманевский, В. М. Ломако, В. А. Быковский), с дислокациями в кремнии (А. А. Патрин, Н. А. Дроздов), с редкоземельными элементами в окисленном пористом кремнии (Н. М. Казюич). С использованием люминесцентных методов выявлена химическая активность примесей инертных газов в кремнии и алмазе (В. Д. Ткачёв, Н. С. Минаев, А. В. Мудрый, А. М. Зайцев), диффузия примесей вдоль треков высокоэнергетических ионов в алмазе (А. М. Зайцев, А. А. Мельников, В. С. Вариченко).

Разработанная на кафедре установка для автоматизированных измерений спектров люминесценции полупроводниковых материалов, приборов и наноструктур (М. С. Русецкий, А. С. Козловский, Н. М. Казюич) используется для научных исследований и в учебном процессе.



А. А. Мельников исследует катодолуминесценцию широкозонных полупроводников — нитрида бора и алмаза. 1985 г.

Основной канал рекомбинации неравновесных носителей заряда из возбужденного состояния к равновесному контролируется процессами безызлучательной рекомбинации. Избыточная энергия возбужденного состояния передается при этом колебаниям кристаллической решетки (фононам). Чем больше дефектов в полупроводнике, тем быстрее он возвращается в равновесное состояние. Таким образом, величина времени жизни неравновесных носителей заряда отражает структурное совершенство кристаллической решетки полупроводника, характеризует «качество» технологического процесса при производстве полупроводниковых приборов.

Среди методов измерения времени восстановления равновесного состояния в полупроводниках одним из самых простых и наглядных является восстановление равновесной проводимости после выключения источника возбуждения. В сочетании с вариацией температуры при измерениях кинетики восстановления этот метод позволяет определить положение в запрещенной зоне энергетических уровней, ответственных за рекомбинацию (В. Ю. Явид). Будучи количественным отражением концентрации дефектов в полупроводниках, величина времени жизни неосновных носителей заряда связана с характеристиками полупроводниковых приборов, использующих свойства неосновных носителей (диоды с $p-n$ -переходом, биполярные транзисторы, фото- и светодиоды).

На кафедре разработаны бесконтактные неразрушающие методы измерения времени жизни неравновесных носителей заряда специально для предприятий электронной промышленности. Эти методы основаны на взаимодействии (поглощении, отражении) СВЧ-излучения со свободными носителями заряда. Оптическое излучение лазера или светодиода генерирует в полупроводнике избыточные неравновесные носители заряда, которые частично поглощают СВЧ-излучение в процессе энергетического обмена между СВЧ-полем и свободными носителями заряда. Измеряя величину поглощения СВЧ-поля во времени, можно записать кинетику



А. М. Зайцев (слева) и В. С. Вариченко (справа) в научной лаборатории исследуют люминесценцию алмаза. 1983 г.

рекомбинации неравновесных носителей заряда. Для повышения чувствительности метода часто измеряют сдвиг фаз между возбуждающим воздействием и регистрируемым сигналом.

Широкое применение на кафедре получили СВЧ-методы детектирования состояния неравновесных носителей заряда. С использованием бесконтактной СВЧ-техники созданы алмазные фотоприемники (А. Г. Захаров), автоматизированные установки для бесконтактной регистрации спектров фотопроводимости в кремнии и алмазе (С. Н. Якубенья, А. Г. Захаров), многофункциональная установка для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в условиях воздействия на образец внешних механических и электрических полей (А. М. Янченко). Разработаны методики измерения величины объемного времени жизни и профилей распределения времени жизни по глубине образца (А. М. Янченко, М. И. Тарасик, С. Н. Якубенья). СВЧ-детектирование неравновесных носителей заряда применено в растровом электронном микроскопе (А. А. Патрин, А. М. Янченко) для визуализации электрически активных дефектов (по аналогии с методом наведенного электронным пучком тока – EVIC, но без приготовления барьерных структур). СВЧ-детектирование, совмещенное с системой сканирования, позволило визуализировать распределение электрически активных дефектов в пластинах кремния на различных стадиях технологического процесса вплоть до металлизации (А. М. Янченко,

С. Н. Якубеня, И. А. Карпович). Разработанные на кафедре установки для измерения величины и распределения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии (А. М. Янченко) внедрены во Всесоюзном электротехническом институте (Москва), в Центре электронной промышленности (г. Зеленоград Московской обл.), а также на ОАО «Интеграл» (А. М. Янченко, С. Н. Якубеня, И. А. Карпович).

Фотоэлектрические методы исследования полупроводников, основанные на явлении фотопроводимости и фотомагнитного эффекта, позволяют определить энергетические параметры уровней радиационных дефектов и глубоких примесных уровней в запрещенной зоне кремния, германия и других полупроводников (В. Б. Яржембицкий, И. П. Козлов, В. В. Петров, О. К. Гусев), установить влияние деформации одноосного сжатия на время жизни неравновесных носителей заряда в кремнии (А. М. Янченко, М. И. Тарасик), разработать модели рекомбинации неравновесных носителей заряда на радиационных дефектах в германии (В. И. Уренёв, В. Ю. Явид).

В результате исследований на кафедре поверхностной фото-ЭДС, возбуждаемой локально светом на границе раздела «полупроводник – электролит», были созданы неразрушающие методы контроля качества пластин кремния (А. А. Патрин, В. А. Суслов, Н. А. Дроздов). Граница раздела «полупроводник – электролит» моделирует барьерную структуру, аналогичную по свойствам p - n переходу или барьеру Шоттки. Генерированные неравновесные носители заряда разделяются полем барьера и могут быть зарегистрированы в режиме фототока при коротком замыкании контактов к полупроводнику и электролиту или в режиме фото-ЭДС при разомкнутых контактах. Величина фото-ЭДС (фототока) зависит при прочих равных условиях от удельного сопротивления полупроводника, времени жизни неосновных носителей заряда, приповерхностного изгиба зон. При сканировании возбуждающего неравновесные носители заряда точечного светового зонда по поверхности полупроводниковой пластины получают топограмму локальной фото-ЭДС, которая отражает степень неоднородности пластины. Неразрушающий характер фотоэлектрического контроля обеспечивается за счет использования электролитов, являющихся компонентами растворов для химической обработки кремния в технологическом процессе. Для промышленного использования метода поверхностной фото-ЭДС разработаны и изготовлены опытные образцы установки фотоэлектрического контроля «Слой-М» и «Слой-М-П». Метод опробован в условиях промышленного производства интегральных микросхем на ОАО «Интеграл» и солнеч-

ных элементов на НПО «Сатурн» (г. Краснодар), где и подтверждена его пригодность для неразрушающего экспресс-контроля качества кремниевых пластин.

Кристаллическая структура материалов обычно определяется дифракционными методами, в которых длина волны падающего излучения сравнима с межатомными расстояниями в кристаллической решетке (т. е. составляет около 1 ангстрема), что соответствует рентгеновскому диапазону. Упорядоченные ряды атомов в кристаллической решетке дей-



А. Р. Челядинский – главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук. 2012 г.

ствуют когерентно как дифракционная решетка, приводя к появлению дифракционных минимумов и максимумов. Теория дифракции рентгеновских лучей основывается на уравнении Брэгга, которое описывает условие усиления рентгеновских лучей в результате их дифракции на атомных плоскостях кристалла. Дифракция рентгеновского излучения происходит на глубинах порядка 10 мкм. Тип кристаллической решетки и величина постоянной решетки задают «дифракционную картину» материала, которая позволяет его идентифицировать. Из анализа распределения интенсивности в дифрагированных пучках получают важнейшую информацию о деформациях решетки в эпитаксиальных, диффузионных и имплантированных слоях, на межфазовых границах.

Для прецизионного измерения периода решетки необходимо с точностью 1 дуговая секунда регистрировать абсолютное значение угла отражения рентгеновских лучей, чего не обеспечивают промышленные дифрактометры. Исследования структурно совершенных полупроводниковых монокристаллов проводят на двухкристалльных дифрактометрах. На кафедре создана такая установка на базе рентгеновского дифрактометра ДРОН-1 (А. Р. Челядинский). Дифрактометр с параллельным расположением кристаллов обладает нулевой дисперсией, а условие брэгговского отражения от исследуемого кристалла выполняется одновременно для всех лучей, когда его кристаллографическая плоскость параллельна плоскости кристалла-монокроматора. В результате этого линия отражения от исследуемого кристалла (при условии высокого совершенства его структуры) будет очень узкой – несколько дуговых секунд. Ошибка



Сотрудники кафедры физики полупроводников. 1991 г.

в определении относительного изменения периода решетки составляет $4 \cdot 10^{-7}$. Наличие дефектов структуры приводит к деформации формы дифракционной линии. Это обстоятельство используется при изучении эпитаксиальных, диффузионно- и ионно-легированных структур, когда достаточно знать изменение периода решетки в модифицированном слое относительно подложки. Рентгеновское излучение проникает гораздо глубже слоя, формируя дифракционную картину как от слоя, так и от подложки. Измеряя угловое расстояние между максимумами отражения от слоя и от подложки, определяют изменение периода решетки в слое относительно подложки.

Измерения периода решетки позволили исследовать накопленные радиационных дефектов при имплантации кремния вплоть до аморфизации нарушенного слоя, а также изучить их отжиг. Выявлены основные стадии восстановления периода решетки в слоях кремния, имплантированных различными ионами (А. Р. Челядинский). Впервые показано, что в имплантированном кремнии количество собственных междоузельных комплексов сравнимо с количеством дивакансий – основного радиационного дефекта в кремнии (В. С. Вавилов, А. Р. Челядинский). Установлено, что в зависимости от плотности тока ионного пучка степень локализации внедренных примесей в узлах решетки кремния непосредственно после имплантации

может изменяться от 0 до 100 %. Изучено вытеснение примесей замещения в междоузлия собственными междоузельными атомами кремния – эффект Воткинса, разработана модель движения в кремнии собственных междоузельных атомов в поле упругих деформаций, создаваемых примесями замещения (Н. И. Бережнов, А. Р. Челябинский, Ю. Р. Супрун-Белевич). Показана возможность управления эффектом Воткинса при имплантации и в процессе термообработки. Разработаны методы подавления процессов трансформации точечных дефектов во вторичные дефектные структуры и методы управления коэффициентом диффузии примесей в имплантированном кремнии, которые внедрены в технологический процесс ОАО «Интеграл».

РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ: ОТ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРОВ ДО НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н. М. Лапчук

Радиоспектроскопия – это научное направление в исследовании квантовых явлений в полупроводниках и диэлектриках с использованием электромагнитного излучения в диапазоне радиоволн от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10 м. Выбор материалов обусловлен способностью сверхвысокочастотного электромагнитного поля проникать в объем исследуемого образца, зондируя его неразрушающим способом. Нескомпенсированные магнитные моменты электронов дают как качественную, так и количественную характеристику процессам, связанным с резонансным поглощением и/или испусканием электромагнитного излучения веществами, помещенными во внешнее постоянное магнитное поле.

С момента открытия в 1944 г. Е. К. Завойским электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) лучшие лаборатории мира приступили к разработке и созданию сложного радиоспектроскопического оборудования для изучения этого явления в парамагнитных материалах.

Интенсивные работы по физике и технике ЭПР-спектроскопии полупроводниковых материалов на кафедре стали проводиться начиная с 1962 г. по инициативе и под руководством В. Ф. Стельмаха.

В 1976 г. на кафедре были получены первые авторские свидетельства [1, 2], ставшие началом изобретательской деятельности



Запуск первого спектрометра ЭПР на кафедре
(слева направо: П. Ф. Лугаков, В. Д. Ткачѐв, В. Ф. Стельмах). 1965 г.



В. Ф. Стельмах — первый разработчик в Республике Беларусь малогабаритного спектрометра ЭПР для экспресс-диагностики парамагнитных объектов. 2010 г.

сотрудников кафедры не только в области радиоспектроскопии, но и в создании уникального оборудования для исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов.

За 50 лет работы на кафедре В. Ф. Стельмах не изменил своему призванию. Все эти годы он одновременно занимается научно-исследовательской, учебно-воспитательной и организационной работой, а также созданием на базе кафедры физики полупроводников крупнейшего в Беларуси центра ЭПР-спектроскопии. На кафедре сосредоточивается лучшее радиоспектроскопическое оборудование: ЭПР-спектрометры ER9 (Karl Zeiss, Йена, Германия), RadioPAN SE/X 2425 (Польша), Varian E112 (США), на котором проводят исследования научные сотрудники, аспиранты и студенты.



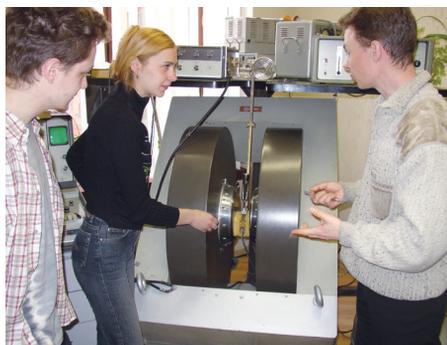
Н. М. Лапчук (слева)
и В. П. Толстых. 1980 г.



А. Н. Жевно (справа)
с аспирантом В. И. Босаком. 1989 г.

В 1979 г. на кафедре А. Н. Жевно и В. Ф. Стельмахом были разработаны методические указания по выполнению лабораторной работы «Расчет угловой зависимости спектров электронного парамагнитного резонанса радиационных дефектов в кремнии», которая не потеряла своей актуальности и сегодня.

Начиная с 1972 г. и по настоящее время научные исследования сконцентрированы в области радиационной физики и радиоспектроскопии полупроводников, а также микроэлектроники и научного приборостроения. Уже в 1984 г. на проводившейся в Казани юбилейной конференции, посвященной 40-летию открытия Е. К. Завойским электронного парамагнитного резонанса, от кафедры было заявлено около 40 докладов. Силами творческого коллектива,



И. И. Азарко и студенты. 2008 г.



Аспирантка из Монголии
Самбуу Мунхцэцэг. 2006 г.



Первый малогабаритный анализатор
электронного парамагнитного резонанса «Минск-12М»

возглавляемого В. Ф. Стельмахом, на кафедре были разработаны [3] первые, не имеющие аналогов малогабаритные анализаторы электронного парамагнитного резонанса «Минск-12М», «Минск-22М» и освоено их серийное производство на предприятии НПО «Политехник». Министерством образования СССР анализатор ЭПР был рекомендован в качестве базового прибора для лабораторного специализированного практикума для студентов естественнонаучных факультетов университетов и институтов.

Малогабаритные спектрометры ЭПР были установлены на двух сейнерах китобойной флотилии «Слава», курсирующих от Владивостока до Антарктиды, на угольных шахтах Монголии, Донбасса («Донбасс Южный») Ростовской области, Кузнецкого угольного бассейна, а также Донецкой и Львовской областей. Спектрометры «Минск-12М» и «Минск-22М» были установлены на Солигорском комбинате калийных солей, Светлогорском заводе «Химволокно» и внедрены в учебный процесс в вузах Беларуси, России, Украины и Монголии.

Золотыми и серебряными медалями ВДНХ СССР были отмечены наиболее значительные разработки сотрудников кафедры: И. З. Рутковского, В. А. Жидовича, В. Ф. Стельмаха, В. Г. Трофимова, Л. В. Цвирко, В. П. Толстых, В. И. Курганского, С. В. Поляруша, Н. А. Салоневича и др. Ими были созданы приборы для автоматической регистрации электрических параметров полупроводников и тонких пленок; установки для измерения эффекта Холла в полупроводниковых материалах; анализаторы электронного парамагнитного резонанса. В. С. Кирановым разработаны и внедрены блоки сопряжения с компьютером спектрометров «RadioPAN SE/X 2425» и «Минск-22М». Из 200 авторских свидетельств и патентов на изобретения В. Ф. Стель-



Малогобаритный специализированный анализатор электронного парамагнитного резонанса «Минск-22М»



Разрабатываемый малогабаритный специализированный анализатор электронного парамагнитного резонанса нового поколения

маха и соавторов более 100 относятся к техническим решениям, используемым в разработке малогабаритных спектрометров ЭПР.

Ни одно научное подразделение республики не может сравниться с кафедрой по количеству приобретенных, разработанных, внедренных в народное хозяйство и активно использующихся сотрудниками, студентами и аспирантами спектрометров ЭПР в научных и учебных целях.

Исследуемые методом ЭПР объекты представляют собой широкий спектр материалов, применяемых в электронике (монокристаллический, поликристаллический и пористый кремний, германий, алмаз (природный и синтетический), углеродные и алмазные CVD-пленки, нанопористые алмазные пленки, наноалмазы). При этом используются различные способы модификации исследуемых материалов: радиационное облучение электронами, гамма-квантами, нейтронами, имплантация ионов примесных атомов, высокоэнергетичная ионная имплантация, отжиги (изохронный, изотермический, термобарический), гидрогенизация.

Целью исследований является изучение радиационной стойкости материалов; кинетики отжигов радиационных дефектов в кристаллах; особенностей высокоэнергетичной ионной имплантации; характера взаимодействия водорода и кислорода с углеродными материалами, германием и кремнием, а также поиск новых материалов для электроники.

Метод ЭПР был использован в качестве основного метода исследования радиационных дефектов в кристаллах в диссертационных

работах Н. А. Соболева (1978 г. — защита кандидатской диссертации, 2001 г. — докторской), Г. Г. Федорука (1981 г. — защита кандидатской диссертации, 2001 г. — докторской), В. П. Толстых (1986 г. — защита кандидатской диссертации), Д. П. Ерчака (1987), Н. М. Лапчук (1993), В. А. Мартинович (1996), И. И. Азарко (1997), Л. В. Стригуцкого (1999), Е. Н. Шумской (2000), Н. И. Горбачука (2002), Самбуу Мунхцэцэг (2007), В. Г. Баева (2009), О. Н. Поклонской (2014).

Ниже приводятся основные научные результаты, полученные в области изучения парамагнетизма дефектов в кристаллической решетке полупроводников и кластеров в гетерогенных системах.

Впервые экспериментально показано, что аморфизация кремния может происходить при облучении нейтронами в дозах порядка 10^{20} см⁻² путем накопления стабильных точечных дефектов, в которых атомы смещены из узлов кристаллической решетки. При этом устойчивость дефектов повышается в кремнии, сильно легированном донорной примесью ($2 \cdot 10^{18}$ см⁻³) или облученном потоками нейтронов большой интенсивности (свыше $3 \cdot 10^{13}$ см⁻² · с⁻¹) [4].

Впервые изучена методом ЭПР и предложена модель структуры таких основных компенсирующих дефектов, как Ge-M1, Ge-M5, Ge-M6, в облученном нейтронами (10^{18} – 10^{20} см⁻²) германии, сильно легированном сурьмой, фосфором и мышьяком соответственно. Указанные центры парамагнитны в положительном зарядовом состоянии и представляют собой вакансию, два атома германия из ближайшего окружения которой замещены двумя атомами соответствующей мелкой донорной примеси [5].

В работе [6] рассчитан со слейтеровскими волновыми функциями тензор магнитного диполь-дипольного сверхтонкого взаимодействия (СТВ) 3s- и 3p-электронов атомов кремния с ядром ³He для различных конфигураций комплекса «вакансия – гелий» в зависимости от положения в решетке атомов кремния и гелия.

Выявлено, что в алмазе, облученном ионами высоких энергий, преобладающим парамагнитным центрам, как и при низкоэнергетичной ионной имплантации, соответствует синглетная линия ЭПР, характерная для разорванной C–C связи. Однако g-фактор и ширина линии ЭПР являются анизотропными, причем анизотропия указанных параметров определяется направлением имплантации. Обнаруженная анизотропия степени асимметрии линии ЭПР-формы Дайсона свидетельствует о повышенной микроволновой проводимости в треках – квазиодномерных упорядоченных структурах вдоль направления облучения алмаза [7].

Обнаружено влияние гидрогенизации на параметры сигнала ЭПР парамагнитных центров аморфных областей при установле-

нии факта снижения концентрации парамагнитных центров с короткими временами релаксации в ионно-имплантированном алмазе при пассивации дефектов атомарным водородом [8].

Определены закономерности образования радиационных дефектов в ионно-облученном слое алмаза и кремния с превалирующим электронным торможением ионов в легированном слое с доминирующим ядерным торможением, а также установление парамагнитных свойств дефектной структуры, включая формирование солитонов в алмазе и трансформацию характеристик спектральных линий в кремнии по глубине облученного слоя при высокоэнергетичном ионном облучении [9].

Разработаны модели ряда парамагнитных центров в облученных высокоэнергетичными ионами кристаллах алмаза и кремния. Установлено, что метастабильность алмаза приводит к более богатому набору видов парамагнитных центров (ПЦ) при воздействии высокоэнергетических частиц, чем в кремнии и германии. Областью локализации ПЦ является оболочка треков высокоэнергетических частиц, расположенная между немодифицированной матрицей кристалла и квазидномерными упорядоченными структурами треков. В результате при имплантации 1–7 МэВ/а. е. м. обеспечивается возможность создания достаточно резких гетеропереходов между пространственно упорядоченными 3D и 1D углеродными фазами [10].

Модифицирование полимеров ионной имплантацией, в том числе в сочетании с диффузионным легированием и термообработкой,



Слева направо: А. А. Мельников, А. М. Зайцев, В. С. Вариченко — первые исследователи кристаллов алмаза — нового материала полупроводниковой электроники. 1989 г.

позволяет формировать электропроводящие слои, магнитные и немагнитные тонкие металлические пленки, а также активно управлять их свойствами, что, наряду с пластичностью и дешевизной, делает их перспективными функциональными материалами для микро-, опто- и наноэлектроники. Схожесть природы парамагнитных центров, возникающих при ионной имплантации и пиролизе полимеров, подтверждается впервые обнаруженным проявлением эффекта Дайсона как для имплантированных полимеров, так и для пиролизованной целлюлозы. Регистрация сигнала ЭПР дайсоновской формы в пирополимерах свидетельствует о наличии в образцах высокочастотной проводимости, которая может быть связана либо с образованием метастабильных графитоподобных структур, разрушающихся при дальнейшем повышении температуры и превращающихся в стабильную графитоподобную микрофазу, либо с формированием углеродных волокон с выраженной тубуленоподобной структурой [11, 12].

В [13, 14] исследовались синтетические алмазы (массой до 0,5 карат), выращенные на аппаратах типа «разрезная сфера» на предприятии «Адамас-БГУ», и поликристаллические алмазные пленки, выращенные CVD-методом в легированной азотом углеводородной атмосфере. Впервые наблюдалось инвертирование сигнала ЭПР атомов азота в монокристаллах синтетического алмаза и поликристаллических алмазных пленках при комнатной температуре (мазерный эффект) при увеличении мощности СВЧ-излучения (до 70 мВт в H_{102} -резонаторе). Инвертирование синфазного сигнала ЭПР (частота модуляции магнитного поля – 100 кГц) обусловлено бистабильностью координации атома азота ($P1$ -центра) в алмазной матрице [15]. Эффект инвертирования синфазного сигнала ЭПР атомов азота в C -форме ($P1$ -центров) в монокристаллах синтетического алмаза и поликристаллических алмазных пленках используется для контроля их качества, а в перспективе – для создания мазеров, работающих при комнатной температуре.

Методом ЭПР установлена специфика парамагнетизма дислокаций, сформированных в процессе имплантации кремния ионами ксенона и криптона, заключающаяся в возникновении магнитного упорядочения в системе локализованных на дислокациях неспаренных электронов, стабильного до температуры не ниже 1270 К [16].

При комнатной температуре методом ЭПР впервые обнаружен магнитный гистерезис, связанный с радиационными дефектами в алмазе. После отжига при 1100 и 1250 °С имплантированных водородом алмазов в них наблюдался гистерезис сигнала ЭПР, свидетельствующий о наличии упорядочения спинов при комнатной температуре. При быстром увеличении индукции B поляризуемого магнитного поля (≈ 10 мТл/мин) центр линии ЭПР смещается в сто-

рону больших значений B , а при быстром уменьшении – меньших значений B , т. е. наблюдается магнитный реверс. Обнаруженный при комнатной температуре магнитный гистерезис линии ЭПР в имплантированных ионами водорода и отожженных в вакууме кристаллах алмаза перспективен для применения в спинтронике [17].

Методом ЭПР выявлено наличие уединенных областей (очагов) магнитного упорядочения радикалов (нескомпенсированных электронных спинов) в поликристаллической CVD-алмазной пластинке, облученной быстрыми реакторными нейтронами флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Предложена модель, связывающая появление новых линий в ЭПР-спектре (g -факторы $g_l \approx 2,7$ и $g_h \approx 1,7$, ширины $\Delta B_l \approx \Delta B_h \approx 8 \text{ мТл}$) со скоплением парамагнитных радиационных дефектов структуры в виде уединенных шарообразных суперпарамагнитных кластеров (ферронов). Установлено, что это связано с наличием в исходных CVD-пленках примеси водорода в достаточно большом количестве и проявлением его пассивирующих свойств при образовании и агрегации радикалов вследствие облучения.

Методом ЭПР впервые измерена дисперсия магнитной восприимчивости при одновременной регистрации резонансного парамагнитного поглощения CVD-алмазом, облученным нейтронами флюенсом $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ [18].

Сотрудники кафедры, используя исключительную роль метода электронного парамагнитного резонанса в неразрушающей диагностике свободных радикалов в веществе, исследуют материалы, нетрадиционные для электроники, но имеющие прямое отношение к углеродсодержащим конденсированным средам. К таким веществам относятся пиролитические графиты, фуллерены, графены, углеродные нанотрубки, все виды ископаемых углей, нефти и продуктов ее переработки, термообработанная целлюлоза. Также активно ведутся работы в сфере ЭПР-исследований совместно со специалистами в области химии, биологии, геологии, медицины.

Исключительно большое число ЭПР-исследований выполнено в поисках решения следующих проблем: выбросоопасность угля в шахтах; загрязнение окружающей среды при сгорании угля как топлива и связанные с этим негативные явления; разработка способов улучшения теплопроводности бурых углей, которые богата Беларусь и сотрудничающая с ней в области изучения бурых углей Монголия. Высокая чувствительность и информативность ЭПР-спектроскопии при исследовании собственных парамагнитных центров углей делают этот метод перспективным для диагностики и оценки фрактальной кинетики в процессах преобразования и де-

струкции угольного вещества [19, 20]. Закономерность в изменении основных параметров спектров ЭПР, выявленная в процессе преобразования угольного вещества как в лабораторных условиях, так и при учете факторов окружающей среды, позволит успешно использовать полученные результаты для диагностики и идентификации происхождения углей различных месторождений. Это важно при решении многих практических задач, в том числе в петрографии и рудогенезе.

За подготовку кадров в области ЭПР-спектроскопии, за достижения в развитии науки и образования в Республике Монголия В. Ф. Стельмах и Н. М. Лапчук награждены медалями. Звание «Почетный профессор Монгольского государственного университета» присвоено доктору физико-математических наук, профессору Н. А. Поклонскому.

В радиоспектроскопии взаимосвязаны и взаимообусловлены понятия «радиотехника» и «объект исследования»: без понимания технического устройства радиоспектрометра невозможно проникнуть в тайну изучаемых квантовых процессов в полупроводниковых материалах, а обнаружение новых явлений в кристаллах невозможно без совершенствования радиоспектроскопического оборудования. Этот непрерывный процесс положен в основу всех научно-исследовательских работ на кафедре.

Библиографические ссылки

1. ЭПР-спектрометр : пат. 556650 СССР : МКИ2 G01N27/78 / Ф. Н. Крылов, Н. А. Поклонский, В. Ф. Стельмах ; дата публ.: 07.01.1977.
2. Гомодинный спектрометр ЭПР : пат. 655955 СССР, G 01 N 27/28 / В. А. Жидович, В. Ф. Стельмах, Л. В. Цвирко ; дата публ.: 05.04.1979.
3. Акунец В. В., Стельмах В. Ф., Цвирко Л. В. Анализатор электронного парамагнитного резонанса : учеб.-справ. пособие. Минск, 2002.
4. ЭПР на аморфных включениях в кремнии, облученном нейтронами / Д. П. Ерчак [и др.] // Вестн. БГУ. 1974. Сер. 1. С. 74–76.
5. Ерчак Д. П., Кособуцкий В. С., Стельмах В. Ф. Структура компенсирующих центров в облученном нейтронами *n*-германии // ФТП. 1989. Т. 23, вып. 9. С. 1539–1544.
6. Босак В. И., Жевно А. Н., Стельмах В. Ф. Характер взаимодействия имплантированного в кремний гелия с атомами решетки // ФТП. 1990. Т. 24, № 3. С. 570–572.
7. Point Paramagnetic Defects in Diamond Irradiated by High-Energy Ions / D. P. Erchak [et al.] // Physica Status Solidi A. 1990. V 121, № 1. P. 63–72.
8. Hydrogen Passivation of the Paramagnetic Centers in Amorphous Regions of Ion Implanted Diamond / D. P. Erchak [et al.] // Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res. 1992. V 69. P. 271–276.

9. Defect Production In Silicon Irradiated With 5,68 GeV Xe Ions / V.S. Varichenko [et al.] // Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res. 1996. V. 107. P. 268–272.
10. *Ерчак Д. П., Ефимов В. Г., Стельмах В. Ф.* ЭПР-спектроскопия низкоразмерных структур, создаваемых ионной имплантацией в природных алмазах и синтетических алмазных пленках // ЖПС. 1997. Т. 64, № 4. С. 421–449.
11. Ионная имплантация полимеров / В. Б. Оджаев [и др.]. Минск, 1998.
12. Ion beam effects in polymer films: structure evolution of the implanted layer / V.N. Popok [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. 1997. V. 129. P. 60–64.
13. *Поклонский Н. А., Лапчук Н. М., Лапчук Т. М.* Инвертированный сигнал ЭПР содержащих азот дефектов в монокристалле синтетического алмаза при комнатной температуре // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80, № 12. С. 880–883.
14. Инвертирование сигнала электронного спинового резонанса P1-центра в кристалле синтетического алмаза / Н. А. Поклонский [и др.] // ЖПС. 2006. Т. 84, вып. 1. С. 9–12.
15. Расчет атомной структуры примеси замещения азота в алмазе кластерным методом молекулярных орбиталей / Н. А. Поклонский [и др.] // Углеродные наноструктуры : сб. науч. тр. Минск, 2006. С. 260.
16. Локальное магнитное упорядочение в кремнии, имплантированном высокоэнергетичными ионами / С. В. Адашкевич [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84, вып. 10. С. 642–645.
17. Оптические и парамагнитные свойства имплантированных водородом алмазов / А. В. Хомич [и др.] // ЖПС. 2007. Т. 74, № 4. С. 485–490.
18. *Поклонская О. Н., Вырко С. А., Лапчук Н. М.* Имплантированный высокоэнергетическими ионами ксенона кристалл природного алмаза: состояние спинового стекла // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2013. № 4. С. 78–83.
19. Role of coal structure in gas-dynamic phenomena / S. Adashkevich [et al.] // Polish Journal of applied chemistry. 2000. XLIV № 2–3. P. 139–144.
20. Brown coal paramagnetic property in the thermal degradation / V.F Stelmakh [et al.] // The Book of the International Conference on Materials Science (ICMS2012), National University of Mongolia, Ulanbaatar, Mongolia on 20–23 August, 2012. Ulanbaator, 2012. P. 83–87.

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ, ФОТОНИКЕ И СПИНТРОНИКЕ

В. К. Ксеневиц, В. А. Доросинец

Особое место, которое занимают низкоразмерные системы в современной науке, определено в первую очередь возможностью наблюдения в них размерных эффектов, под которыми в широком смысле слова понимают комплекс явлений, связанных с изменением свойств вещества вследствие:

- уменьшения размера составляющих системы частиц;
- увеличения вклада границ раздела в свойства системы;
- сопоставимости размера систем хотя бы в одном пространственном направлении с физическими параметрами, имеющими размерность длины и характеризующими протекающие в этих системах процессы.

Поэтому одним из распространенных определений низкоразмерных систем является следующее. Низкоразмерными называют такие системы, размеры которых хотя бы в одном пространственном направлении сопоставимы по величине с одним из параметров, имеющих размерность длины и характеризующих происходящие в этих системах процессы.

Интерес к исследованию низкоразмерных систем обусловлен появлением принципиально новых свойств (электрических, механических, оптических, магнитных и т. д.) при уменьшении объема какого-либо материала по одной, двум или трем координатам. Соответственно, низкоразмерные системы могут быть двумерными, одномерными и нульмерными. Обычно существенное изменение свойств происходит в материалах, размеры которых хотя бы в одном измерении находятся в нанометровом диапазоне (от 1 до 100 нм, $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), поэтому их называют наноматериалами. Технологии, применяющиеся для создания таких материалов, называют нанотехнологиями. Термин «нанотехнология» впервые использовал в 1974 г. японский ученый Н. Танигути для описания материалов с линейными размерами в субмикронной области. Широко применяться этот термин стал после появления в 1986 г. книги Э. Дрекслера «Машины создания: Грядущая эра нанотехнологии» («Engines of Creation: the coming era of nanotechnology»).

Впервые возможность проявления принципиально новых эффектов в низкоразмерных структурах была обоснована Р. Фейнманом в 1959 г. в знаменитом докладе «Внизу полным-полно места» («There's Plenty of Room at the Bottom. An Invitation to Enter a New Field of Physics»), сделанном на ежегодной встрече Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте.

В докладе Р. Фейнман предсказал создание микроскопов, которые предоставят возможность наблюдения отдельных атомов и станут необходимым инструментом в исследовании наноразмерных объектов, формировании нанобъектов электронным лучом (метод, реализованный впоследствии в электронно-лучевой литографии); позволят механически перемещать отдельные атомы для создания наноразмерных структур, создавать миниатюрные элементы памя-

ти, хранить огромные объемы информации. Многие из предсказаний Р. Фейнмана уже реализованы либо близки к реализации. Поэтому зачастую считается, что своим историческим выступлением он заложил будущие основы нанотехнологий.

Существенным вкладом в развитие физики низкоразмерных систем и нанотехнологий стала разработка принципиально новых технологических методов создания и диагностики наноразмерных структур.

Так, в 1981 г. исследователями ИВМ Г. Биннингом и Г. Роером был изобретен сканирующий туннельный микроскоп, который, наряду с атомно-силовым микроскопом, предоставляет исследователям необходимые инструменты регистрации, характеристики, препарирования и манипулирования наноразмерными объектами.

Значительному прогрессу в развитии физики низкоразмерных систем и нанотехнологий способствовала также разработка методов молекулярно-лучевой эпитаксии и химического осаждения из газовой фазы, в результате развития которых была получена возможность формирования двумерных квантовых ям и квантовых точек. Важными нанотехнологическими методами в настоящее время являются имплантация сфокусированным ионным пучком, электронно-лучевая и ионно-лучевая литография. Кроме того, для получения наноструктур используются эффекты молекулярной самоорганизации.

Развитие методов формирования наноразмерных структур привело к открытию таких эффектов, как квантование проводимости при туннелировании электронов между наночастицами, гигантское магнитосопротивление, квантовый и дробный квантовый эффект Холла, на основе которых создаются современные приборы и устройства.

В электронике существуют две основные тенденции применения полупроводниковых наноструктур. С одной стороны, совершенствование технологических методов создания интегральных микросхем приводит к возможности увеличения числа активных элементов, размещаемых на единице площади, и, следовательно, к повышению информационной емкости и быстродействия микросхем. Такие структуры используются и в информационных технологиях, в частности при производстве процессоров современных компьютеров. В настоящее время достигнута возможность создания интегральных микросхем с размерами элементов меньше 10 нм. С другой стороны, при уменьшении размеров отдельных элементов интегральных микросхем начинает проявляться волновая природа носителей заряда в твердом теле, электронный спектр но-

сителей заряда становится дискретным. Формирование структур с заданным электронным спектром позволяет создавать приборы, в которых применяются квантовые эффекты (резонансное и одноэлектронное туннелирование, интерференция электронных волн, размерное квантование и т. д.). Так, на основе периодически расположенных тонких слоев различных полупроводников (двумерных низкоразмерных систем – квантовых ям) разработаны транзисторы с высокой подвижностью электронов ($\sim 10^4$ см²/В · с при комнатной температуре), которые применяются в радарх и средствах связи миллиметрового и микроволнового диапазона длин волн. Дальнейшее развитие электроники будет основываться на повышении быстродействия и информационной емкости интегральных микросхем при одновременном снижении энергопотребления не посредством простой пропорциональной миниатюризации элементов, а в результате использования квантовых явлений. Так, время переключения транзисторов, принцип работы которых основан на эффекте резонансного туннелирования, составляет величины от десятых долей до нескольких пикосекунд. Разработка электронных приборов (с нанометровыми размерами элементов), функционирование которых основано преимущественно на использовании квантово-механических эффектов, привела к возникновению новой области науки и техники – нанoeлектроники, одним из родоначальников которой является Р. Ландауэр. Уже в 1957 г. он заложил основы квантово-механических расчетов электропроводности низкоразмерных структур.

Возможность управляемого изменения электронного спектра полупроводниковых материалов при уменьшении их размеров до нанометрового диапазона используется и при создании устройств фотоники, в частности для производства оптических фильтров различного диапазона длин волн, систем управления световыми потоками. Благодаря развитию нанотехнологий и их применению при создании наноструктурированных систем распространения, передачи и преобразования электромагнитного излучения появилась новая междисциплинарная область исследований – нанофотоника. Так, на основе массивов полупроводниковых квантовых точек (нульмерных упорядоченных полупроводниковых наноразмерных структур) создаются лазеры и светодиоды, излучающие в ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра, фотоприемники для среднего инфракрасного диапазона длин волн. Дальнейшее развитие нанотехнологий позволит создавать одноэлектронные и однофотонные устройства, управляющие переносом одиночных

электронов и распространением одиночных квантов света. Это даст возможность существенно снизить энергопотребление в таких устройствах.

Особенности магнитных свойств наноматериалов применяются при разработке и создании устройств спинтроники – раздела наноэлектроники, в котором управление спином электрона представляет собой ключевой принцип хранения и передачи информации. Спинтроника в перспективе позволит создать структуры и схемы с более высоким быстродействием при одновременном сокращении энергопотребления и повышении плотности элементов. Для управления спином электрона применяется либо магнитное поле (эффект Зеемана), либо электрическое поле (эффекты Рашбы и Дрессельхауза). Магнитные свойства низкоразмерных систем уже используются при создании элементов магнитной памяти со сверхвысокой плотностью записи. В качестве элементов памяти могут применяться как массивы магнитных наночастиц, так и низкоразмерные многослойные системы, состоящие из периодически расположенных ферромагнитных и немагнитных материалов. В первом случае каждая магнитная наночастица является носителем одного бита информации. При расстоянии между частицами 100 нм плотность записи составляет 10 Гбит/см². Принципиальным ограничением увеличения плотности записи в результате уменьшения размеров ферромагнитных наночастиц является экспоненциальное возрастание вероятности распада их намагниченного состояния в силу термических флуктуаций. Многослойные структуры ферромагнетик/диамагнетик в настоящее время применяются в качестве магнитных датчиков, работающих на основе эффекта гигантского магнитосопротивления, для считывания информации в жестких дисках компьютеров.

Использование низкоразмерных систем в качестве биологических, химических, газовых датчиков позволяет повысить их чувствительность в силу высокоразвитой наноструктурированной поверхности. В качестве различных высокочувствительных датчиков (давления, температуры, ускорения, угловых скоростей и т. д.) применяются также микро- и наноэлектромеханические системы, которые совмещают в себе микро- или наноэлектронные компоненты, созданные методами традиционной электронной технологии, с механическими элементами, полученными при помощи микрообработки. В силу своих малых размеров микро- и наноразмерные элементы таких систем сверхчувствительны к изменению различных параметров окружающей среды. Сигнал, передаваемый от таких элементов, обрабатывается микропроцессором, который выраба-

тывает алгоритм принятия решения и выдает команды для ответных действий микро- и наномеханических элементов. Микроэлектромеханические датчики применяются в системах безопасности автомобилей, на основе микроэлектромеханических систем создаются микродвигатели, микророботы, микронасосы, микрокапиллярные устройства для адресной доставки контролируемых количеств веществ.

Среди низкоразмерных систем разнообразного назначения важное место в применении в различных областях техники занимают углеродные низкоразмерные структуры (нульмерные – фуллерены, одномерные – углеродные нанотрубки и двумерные – графен). Наибольшее значение для практического применения среди них получили углеродные нанотрубки, которые, благодаря своей уникальной структуре, обладают высокой проводимостью и теплопроводностью, механической прочностью, химической стабильностью. В последние годы достигнут существенный прогресс в разработке методов синтеза и очистки нанотрубок, что дает возможность производить нанотрубки хорошего качества и в большом количестве, а также снизить цены на единицу продукции. Реальное применение углеродных нанотрубок основано на использовании свойств массивов нанотрубок. Это объясняется высокой стоимостью и, соответственно, нецелесообразностью создания приборов и устройств, действие которых основано на свойствах одиночных нанотрубок. Одним из немногочисленных примеров применения одиночных нанотрубок является создание на их основе зондов для атомно-силовой и электронной микроскопии. В настоящее время уже разработаны и производятся в промышленном масштабе устройства и материалы на основе углеродных нанотрубок. К ним относятся прежде всего такие приложения, в которых нанотрубки применяются в составе композитных материалов (например, при производстве литиевых ионных батарей и электростатических экранов, где многослойные углеродные нанотрубки используются в качестве добавок, что приводит к улучшению свойств композитов). Такое качество углеродных нанотрубок, как высокая прочность, может использоваться также при создании упрочняющих композитных материалов для бытовых нужд и для применения в аэро- и космической промышленности. Созданы прототипы плоских дисплеев на основе массивов вертикально ориентированных нанотрубок. Однако для применения в электронике графен, в силу своей двумерной структуры, является более перспективным материалом по сравнению с углеродными нанотрубками.

Важное значение, которое имеют низкоразмерные структуры для развития современной науки и техники, подтверждается присуждением Нобелевских премий за достижения в этой области. Так, в 1985 г. Нобелевской премией был награжден К. фон Клитцинг (за открытие квантового эффекта Холла), в 1986 г. – Э. Руска (за создание электронного микроскопа), Г. Биннинг и Г. Роеер (за создание сканирующего туннельного микроскопа), в 1996 г. – Р. Ф. Курл, Г. В. Крото и Р. Э. Смолли (за открытие фуллеренов), в 1998 г. – Р. Б. Лафлин, Х. Л. Штормер и Д. К. Тсуи (за открытие дробного квантового эффекта Холла), в 2000 г. – Ж. И. Алфёров и Г. Кроемер (за разработку гетероструктур для высокоскоростной электроники и оптоэлектроники), Дж. С. Килби (за вклад в изобретение интегральной схемы), в 2007 г. – А. Ферт, П. Грюнберг (за открытие гигантского магнитосопротивления), в 2010 г. – А. Гейм и К. Новосёлов (за эксперименты по получению графена).

На кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники проводились исследования как по разработке методов получения низкоразмерных структур и нанокомпозитов, так и по исследованию их электрических, оптических, магнитных и магнитотранспортных свойств. Были получены следующие результаты:

- совместно с НИЛ физической химии и модификации целлюлозы НИИ физико-химических проблем БГУ разработаны физико-технологические основы метода образования массивов низкоразмерных полимерных сетчатых структур с ячейками гексагональной формы (диаметр ячеек составлял от 500 нм до 1 мкм, толщина перемычек – 20–100 нм) при использовании самоформирования в тонком слое полимерного раствора, осажденного на поверхность охлажденной воды (рис. 1, а). Разработан метод изготовления наноструктурированных и мезоскопических низкоразмерных сетей из металлических, полупроводниковых и изолирующих материалов. Низкоразмерные упорядоченные сети из SiC, C, SnO₂ с гексагональными ячейками были получены методом термообработки полимерных предшественников. Полупроводниковые сетчатые структуры получены методом ионного травления слоев GaAs (рис. 1, б) и гетероструктур GaAs/AlGaAs через целлюлозные сетки. Предложена модель для описания механизма транспорта заряда в низкоразмерных углеродных и GaAs-сетчатых структурах, учитывающая влияние квантовых поправок к проводимости [1, 2];

- разработана технология получения композиционных материалов с размером металлических включений в диапазоне от 10 до 100 нм, и исследованы процессы электронного транспорта, магнито-

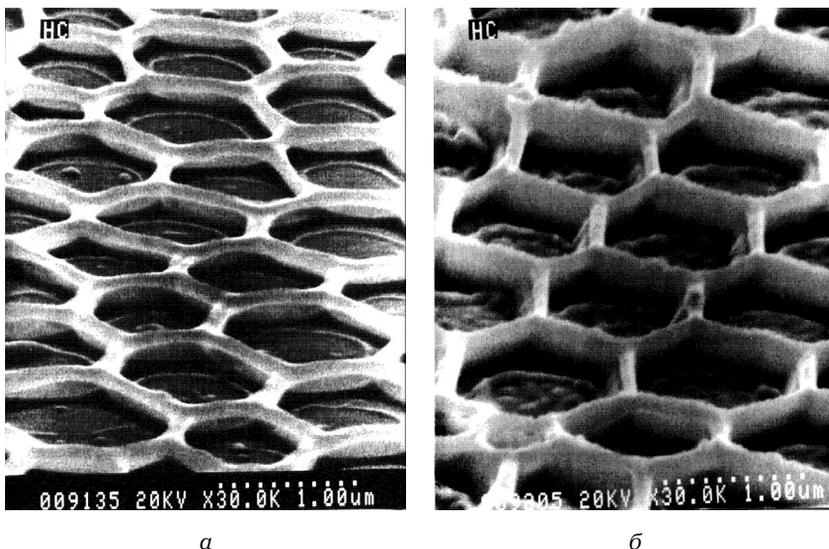


Рис. 1. Микрофотографии низкоразмерных сетчатых структур, полученные методом сканирующей электронной микроскопии:
а – полимерные сетчатые структуры;
б – сетчатые структуры из GaAs

сопротивление, а также их магнитные свойства. Получены образцы углеродных волокон и пленок, содержащие нанокристаллиты кобальта и серебра, разработана методика получения нанокомпозитов с управляемо варьируемой величиной электропроводности, что позволило изучить особенности перехода «металл – изолятор», реализовать режимы туннельной электропроводности между отдельными металлическими наночастицами в диэлектрической матрице и режим квантовых поправок к классической электропроводности, когда электроперенос осуществляется по участкам углерода с турбостратной структурой, представляющим собой несколько разупорядоченных плоскостей графена. Были обнаружены проявления эффектов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации, определено изменение их вкладов с температурой, а также эффекта гигантского магнитосопротивления в данных структурах, рассчитаны параметры, характеризующие квантовые эффекты. Для структур с наночастицами из магнитных металлов выявлены эффекты суперпарамагнетизма и спинового стекла, магнитного гистерезиса, рассчитаны параметры, характеризующие магнитную анизотропию наночастиц [3];

• установлены механизмы транспорта заряда в массивах одностенных и многостенных углеродных нанотрубок различной геометрии (волокнах, пленках, покрытиях на поверхности кварцевых волокон, полимерных композитах с нанотрубками в качестве наполнителя), учитывающие влияние контактных барьеров между нанотрубками, а также эффектов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации, проявляющихся в отдельных нанотрубках. Обнаружен импеданс индуктивного типа в массивах однослойных углеродных нанотрубок, вызванный кинетической индуктивностью отдельных нанотрубок. Выявлен вызванный болометрическим нагревом рост проводимости массивов углеродных нанотрубок при воздействии электромагнитного излучения в различных диапазонах частот электромагнитного спектра (инфракрасном, микроволновом, терагерцовом).



В. А. Доросинец — ведущий научный сотрудник НИЛ физики электронных материалов

В массивах углеродных нанотрубок, в которых в области низких температур перенос носителей заряда осуществлялся посредством прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, при воздействии терагерцовым излучением при низких температурах наряду с медленным болометрическим сигналом впервые обнаружен быстрый (с временем затухания порядка 100 мкс) сигнал, вызванный индуцированной терагерцовым излучением прыжковой проводимостью [4].

Одновременно с разработкой технологических основ получения низкоразмерных структур и исследованием их структурных, электрических, оптических, магнитотранспортных и магнитных свойств на кафедре существенное внимание уделяется моделированию различных углеродных низкоразмерных систем и проведению квантово-химических расчетов их структуры, что позволяет развивать рабочие гипотезы, предсказывающие возможность создания различных устройств на основе наноматериалов. Среди основных результатов можно отметить следующие [5]:



В. К. Ксенович – заведующий
НИЛ физики электронных материалов

- рассчитаны условия существования и свойства молекулы C_{10} из 10 атомов С в форме пятилучевой звезды – прекурсора для образования фуллеренов (полых макромолекул) из углеродной плазмы;
- рассчитана кулоновская дисторсия воронкообразной макромолекулы фталоцианина, содержащей в центре атом Pb (или Sn). Показана возможность создания на основе макромолекул такого типа электрически управляемых однофотонных источников, функционирующих в лабораторных условиях;
- проведены квантово-химические расчеты перестройки С–С-связей в однослойной углеродной нанотрубке при ее аксиальном упругом растяжении. Предсказаны деформационные фазовые переходы «узкозонный полупроводник – металл» для нанотрубок типа *armchair* и «узкозонный полупроводник – широкозонный полупроводник» для нанотрубок типа *zig-zag*;
- разработана модель магнитоуправляемого электрического ключа из двух углеродных нанотрубок, наполненных магнитоактивными эндофуллеренами;
- рассчитаны условия реализации солитоноподобного движения одиночного электрона проводимости в квазиодномерной проволоке, погруженной в диэлектрическую матрицу с распределенной вдоль проволоки индуктивностью;
- рассчитаны магнитные свойства графеновых нанолент типа *zig-zag*, пассивированных по обоим краям атомами водорода, а так-

же дипольный электрический момент нанолент с атомами водорода на одном краю и атомами фтора на другом;

- предсказана возможность существования восьми типов однослойных воронок из графена. Предложена модель кантилевера из углеродной поверхности;

- предложена модель нанодинамометра (рис. 2), основанного на относительном смещении слоев бислоя графена под действием внешней силы и соответствующем изменении электрической проводимости между слоями;

- предложена схема электромеханического генератора переменного тока на основе закрепленной с двух концов наноленты графена (в качестве автоэлектронного катода) над поверхностью анода.

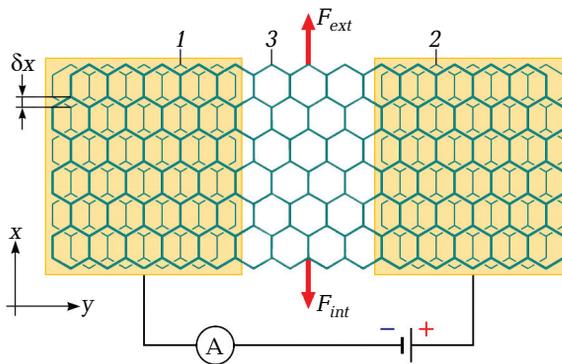


Рис. 2. Схема нанодинамометра:

1 и 2 – нижние графеновые слои, закрепленные на электродах;
3 – верхний подвижный графеновый слой

Дальнейшие исследования на кафедре в области физики и технологии наноматериалов будут направлены на развитие атомно-молекулярной теории низкоразмерных систем, а также на поиск новых приложений как для ранее полученных, так и для вновь созданных наноструктур.

Библиографические ссылки

1. Mesoscopic and nanoscale soft condensed matter architectures on semiconductor surfaces / V.A. Samuilov [et al.] // Nanostructured Materials and Devices: Proceedings of the Sixth International symposium on Quantum Confinement, PV 2001-19, 200th Meeting of the Electrochemical Society, San Francisco, CA, September 5–6, 2001 / ed. M. Cahay [et al.]. Pennington, 2001. P. 209–225.

2. *Govor L. V. Microporous Honeycomb-Structured Polymer Films // Ordered Porous Nanostructures and Applications / ed. R. V. Wehrspohn. N. Y., 2005. P. 89–107.*

3. Перспективные полупроводниковые материалы: физика и технология / В. А. Доросинец [и др.] // Выбр. науч. працы Беларус. дзярж. ун-та : у 7 т. / адк. рэд. В. М. Анішчык. Мінск, 2001. Т. 5. С. 413–434.

4. *Ksenevich V, Galibert J, Samuilov V Charge transport in carbon nanotubes films and fibers // Carbon Nanotubes / ed. J. M. Marulanda. Vukovar, Croatia, 2010. P. 123–145.*

5. *Поклонский Н. А. Физика и техника низкоразмерных систем из углерода // Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2014) : сб. пленар. докл. IV Междунар. науч. конф., Минск, 7–10 окт. 2014 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. Минск, 2015. С. 121–136.*

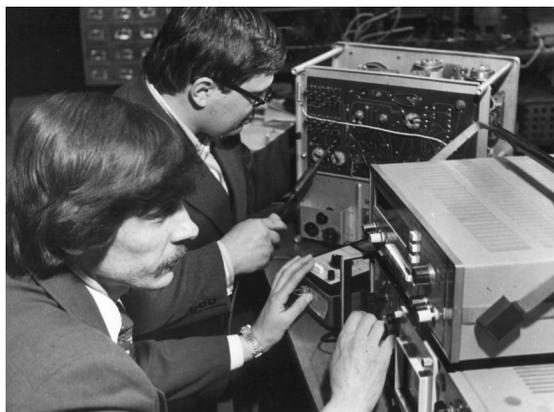
**Научно-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ
ПРОЦЕСС НА КАФЕДРЕ
ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДОСТИЖЕНИЯ ПРОШЛОГО – ЗАЛОГ УСПЕШНОГО БУДУЩЕГО

*С. В. Агашкевич, Н. М. Лапчук,
Т. М. Лапчук, А. Н. Олешкевич*

Наиболее плодотворным в жизни кафедры в плане создания нового оборудования и активного внедрения разработок в народное хозяйство стал период 1980–90-х гг. Это было обусловлено сочетанием возможностей достигнутого высокого уровня научно-педагогической подготовки коллектива сотрудников кафедры с благоприятной конъюнктурой, вызванной быстрым ростом в республике численности научных и промышленных организаций в области полупроводниковой электроники на фоне устойчивого режима финансирования.



*В. Г. Трофимов (на переднем плане)
и В. В. Гусаков. 1990 г.*

С 1981 по 1998 г. кафедру возглавлял кандидат физико-математических наук, доцент В. Ф. Стельмах. В это время научные исследования были сосредоточены в области радиационной физики и радиоспектроскопии полупроводников, а также микроэлектроники и научного приборостроения.

Фундаментальные достижения сотрудников кафедры за этот период отражены в следующих разработках и внедрениях:

1. Открытие явления стойкости полупроводниковых материалов Si, Ge, GaAs и структур на их основе к внешним высокоэнергетичным воздействиям в активном режиме хранения и эксплуатации (А. В. Латышев, В. В. Гусаков, В. Ф. Стельмах) [1, 2].

2. Изготовление высокотемпературных датчиков на основе облученных нейтронами кристаллических зерен алмаза, используемых для определения критической рабочей температуры лопаток турбореактивных двигателей. Работа велась по заказу Центрального института авиационного моторостроения им. П. И. Баранова (ЦИАМ) (В. С. Вариченко, А. М. Зайцев, Н. М. Казючиц, В. Ф. Стельмах, Н. М. Лапчук) [3].

3. Открытие полупроводниковых свойств торфа и гуминовых кислот (В. П. Стригуцкий, Л. В. Стригуцкий, Л. С. Любченко, В. Ф. Стельмах) [4–6].

4. Установление закономерностей преобразования природных органических полупроводников, приводящих к чередующимся гетерогенным переходам их структур (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич, Л. В. Стригуцкий, Г. Д. Фролков) [7, 8].

5. Установление закономерностей и механизмов возникновения опасных газодинамических явлений в шахтах для обеспечения безопасности жизнедеятельности (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич, Л. В. Стригуцкий) [9–11].

6. Установление особенностей проявления свойств спинового стекла в каменных углях высшей степени метаморфизма (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич) [12].

7. Существенное развитие возможностей метода ЭПР для определения степени метаморфизма и содержания углеродной фазы по значению g -фактора каменного угля (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич, В. С. Киранов, Н. М. Лапчук) [13].

8. Разработка и внедрение комплекта научного оборудования для изучения процесса производства жидкого и газообразного топлива из растительных и древесных отходов для более широкого использования местных возобновляемых источников энергии (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич, В. С. Киранов, Е. К. Дорожок) [14].

9. Диагностика состояния двигателей внутреннего сгорания по магнитному резонансу продуктов износа в смазочных маслах (Л. В. Цвирко, В. Ф. Стельмах, И. А. Карпович, В. Г. Трофимов, И. И. Азарко, А. С. Колупаев) [15].

10. Фундаментальные разработки по углеродным волокнам как важному связующему компоненту в технологии композиционных материалов для практического использования при решении экологических проблем, экономии ресурсов и безопасности жизнедеятельности (В. Ф. Стельмах, С. В. Адашкевич, Л. В. Стригуцкий, И. А. Башмаков, Л. В. Соловьёва) [16, 17].

11. Разработка и внедрение: а) дозиметров на кремнии, галогениде серебра; б) дозиметрии поглощенной дозы ионизирующего излучения; в) дозиметрии на основе ЭПР целлюлозы в период ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС (Л. В. Цвирко, В. Г. Трофимов, В. Ф. Стельмах) [18, 19].

Подтверждением заслуг кафедры в решении фундаментальных проблем окружающей среды стало избрание в декабре 1995 г. Международной академией наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) В. Ф. Стельмаха действительным членом (академиком) МАНЭБ по секции «Экология».



Диплом действительного члена (академика) МАНЭБ по секции «Экология» В. Ф. Стельмаха. 1995 г.



Золотые и серебряные медали ВДНХ – достойная награда создателям установок для измерения эффекта Холла в полупроводниковых материалах и автоматической регистрации электрических параметров полупроводников и тонких пленок

Результаты исследований полупроводниковых материалов и приборных структур на их основе были внедрены в учебный процесс вузов страны и на предприятия Светлогорска, Солигорска, Донецка, Великих Лук. Созданные установки для автоматической регистрации электрических параметров полупроводников и тонких пленок и установки для измерения эффекта Холла в полупроводниковых материалах были отмечены золотыми и серебряными медалями ВДНХ.

Результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ отражены в более чем 500 печатных работах и защищены более чем 200 патентами и авторскими свидетельствами.

Вышеперечисленные достижения служат фундаментом для будущих технических разработок, новых идей и дальнейшего развития исследований в области физики полупроводников и нанозлектроники.

Библиографические ссылки

1. Гусаков В. В., Курганский В. И., Латышев А. В. Корреляция статических и динамических параметров полупроводниковых генераторных диодов СВЧ // «Электроника СВЧ»: материалы X Всесоюзн. конф. : в 2 т. Минск, 1983. Т. 2. С. 361–362.
2. Генератор сверхвысоких частот : пат. 926754 Респ. Беларусь : МПК Н03В 7/14 / В. К. Бензарь, В. В. Гусаков, А. В. Латышев, В. Ф. Стельмах ; дата публ.: 07.05.1982.

3. *Поклонский Н. А.* Наноструктурирование кристаллических зерен природного алмаза ионизирующим излучением // ФТП. 2005. Т. 39, № 8. С. 931–934.
4. *Стригуцкий В. П.* Особенности ЭПР-спектроскопии природных высокомолекулярных соединений // Химия твердого топлива. 1981. № 5. С. 21–27.
5. *Белькевич П. И., Минкевич М. И., Стригуцкий В. П.* Влияние отдельных компонентов на уровень электронного парамагнетизма торфа при его термолизе // Доклады АН БССР. 1973. Т. XVII, № 6. С. 525–528.
6. О природе парамагнетизма гумусовых веществ и перспективах применения метода ЭПР в почвоведении / В. П. Стригуцкий [и др.] // Почвоведение. 1989. № 7. С. 41–51.
7. Зависимость g -фактора углеродных наноструктур каменных углей от степени метаморфизма / С. В. Адашкевич [и др.] // Материалы VIII Междунар. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (ФНС – 2014). Минск, 2014. С. 197–203.
8. Магнитоспектроскопические свойства каменных углей низкой степени метаморфизма / Г. Шилагарди [и др.] // Наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / под ред. О. Г. Пенязькова и Э. М. Шпилевского. Минск, 2015. С. 88–101.
9. *Фролков Г. Д.* Исследование молекулярной структуры каменных углей пластов Донбасса с целью прогноза их выбросоопасности : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20. Новочеркасск, 1976.
10. Способ идентификации выбросоопасного участка угольного шахтопласта : пат. 3557 Респ. Беларусь : МПК С1, G01R 23/16 / С. В. Адашкевич, Л. В. Стригуцкий, В. Ф. Стельмах ; дата публ.: 30.09.2000.
11. Role of coal structure in gas-dynamic phenomena / S. Adashkevich [et al.] // Polish Journal of Applied Chemistry. 2000. V. 44, № 2–3. P. 139–144.
12. Исследование динамики спиновых систем методом ЭПР : учеб. пособие / И. З. Рутковский [и др.]. Минск, 2000.
13. О корреляции технологических и радиоспектроскопических параметров каменных углей / С. В. Адашкевич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. V Международ. науч. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2012. С. 9–12.
14. Установка пиролиза по переработке древесных отходов / С. В. Адашкевич [и др.] // Альтернативные источники сырья и топлива : тез. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Аист-2009», Минск, 26–28 мая 2009 г. Минск, 2009. С. 47.
15. *Акунец В. В., Стельмах В. Ф., Цвирко Л. В.* Анализатор электронного магнитного резонанса : учеб.-справ. пособие. Минск, 2002.
16. Об особенностях спектров ЭПР углеродсодержащих материалов с системой сопряженных связей при высоких уровнях СВЧ мощности / С. В. Адашкевич [и др.] // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / редкол.: П. А. Витязь (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2008. С. 60–64.
17. О влиянии связующего в композиционном материале на магниторезонансное поглощение энергии СВЧ / С. В. Адашкевич // Электроника инфо. 2015. № 5. С. 55–56.

18. Дозиметр поглощенной дозы ионизирующего излучения : пат. 3673 Респ. Беларусь : С 1/G01T1/02 / Н. И. Горбачук, В. С. Гурин, Н. А. Поклонский, С. К. Рахманов, В. Ф. Стельмах ; дата публ.: 12.30.2000.

19. Дозиметр поглощенной дозы ионизирующего излучения / С. В. Адашкевич [и др.] // IV Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения : тез. докл. Минск, 2009. С. 239–241.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

И. И. Азарко

Научные направления кафедры ориентированы на интеграцию учебного процесса и науки с привлечением к выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ преподавателей, научных сотрудников, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов. Из основных направлений можно выделить следующие:

- экспериментальное исследование и компьютерное моделирование физических процессов в полупроводниках и наноструктурах;
- разработка новых материалов и технологий элементной базы микро- и наноэлектроники, спинтроники, светоизлучающих и фоточувствительных структур;
- разработка физико-технологических принципов формирования функциональных элементов электроники на основе композитных материалов; изучение электрофизических, магнитных и оптических явлений в наноматериалах, в том числе обусловленных квантово-размерными эффектами;
- физика углеродных наноструктур (фуллерены, нанотрубки, графен). Алмазная и полимерная электроника;
- разработка методов неразрушающего контроля, экспресс-диагностики материалов и приборных структур, а также программно-обеспечения и автоматизация измерительных систем;
- проектирование и программирование микроконтроллерных систем. Программируемые интеллектуальные датчики. Приборостроение.

Прикладные цели на ближайшую перспективу: создание научно-исследовательского комплекса измерения и контроля электр-

тродинамических характеристик наноструктурных композитных материалов в СВЧ-диапазоне; изготовление и разработка методического обеспечения установки для спектроскопии глубоких уровней; разработка программы расчета кинетики формирования кислородных преципитатов в кремнии в условиях, соответствующих технологическим этапам изготовления сверхбольших интегральных схем; повышение надежности приборов полупроводниковой электроники посредством легирования изовалентными примесями эпитаксиальных структур на основе монокристаллического кремния; формирование «чистых» рабочих зон для изготовления интегральных микросхем.

В перспективе на первый план объектов научных исследований выходят низкоразмерные полупроводниковые структуры, обеспечивающие использование квантоворазмерных эффектов в электронике, наноструктурированные материалы, в том числе композиты, предназначенные для создания приборов функциональной электроники, углеродные наноструктуры (фуллерены и углеродные нанотрубки). Однако кремниевые технологии по-прежнему будут составлять основу микроэлектронной промышленности как во всем мире, так и в Республике Беларусь, что особенно важно. Поэтому в долгосрочной перспективе кафедра физики полупроводников и нанoeлектроники, наряду с новыми направлениями в области нанотехнологий и нанoeлектроники, планирует продолжить традиционные работы в области радиационной физики твердого тела и физики полупроводниковых приборов.

Развитию научных исследований будет способствовать решение следующих задач:

- совершенствование традиционных и разработка новых методов создания полупроводниковых композитов на основе эффектов самоорганизации, преципитации элементов второй фазы из пересыщенных твердых и жидких растворов, магнитного упорядочения, островкового роста гетероматериалов и пленочных покрытий, осаждения веществ в пространственно ограниченные пористые матрицы;
- исследование электрофизических и оптических процессов, протекающих на границах раздела фаз в композиционных материалах, в том числе процессов, обусловленных размерными эффектами;
- изучение электрических, магнитных и оптических свойств композитов, определяемых стохастическим характером распределения фаз по объему композита и другими топологическими особенностями (например, фрактальной геометрией границ раздела);

- адаптация существующих и разработка новых методик изучения композитов, обеспечивающих возможность целенаправленного совершенствования технологий получения материалов, в том числе и непосредственной коррекции технологических режимов в процессе синтеза композитов;

- разработка и создание новых приборных структур для опто-, микро- и наноэлектроники;

- исследования, направленные на создание физико-химического базиса новых методов управляемого синтеза и модификации монокристаллов алмаза электронного качества и углеродных наноматериалов;

- разработка универсальной методики диагностики алмазов и других видов углеродных материалов;

- создание теоретической базы (модели, методы расчета, алгоритмы и компьютерные программы) для описания электронных свойств углеродных наноматериалов;

- разработка физических принципов построения и функционирования элементов электроники на основе алмазов, углеродных нанотрубок и их возможных комбинаций.



В. К. Ксеневи́ч — координатор учебно-научного центра по наноматериалам и нанотехнологиям БГУ, заведующий НИЛ физики электронных материалов. 2014 г.

Базой для успешной научной деятельности кафедры являются традиции отечественной научной школы по физике полупроводников, основателем которой по праву считается первый заведующий кафедрой В. Д. Ткачёв. Сейчас школа насчитывает более 200 активно работающих ученых. Представители школы трудятся в научно-исследовательских институтах НАН Беларуси и вузах Республики Беларусь (БГУ, БНТУ, БГТУ, БГУИР, БГМУ, ПГУ (Полоцком государственном университете)), НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Институте атомной и молекулярной физики, Минском НИИ радиоматериалов. Выпускники кафедры и представители ее научной школы работают также в Щецинском университете (Польша), Люблинском техническом университете (Польша), Кошалинском техническом университете (Польша),

Рурском университете (Бохум, Германия), университете г. Ульм (Германия), Ольденбургском университете (Германия), университете г. Ольборг (Дания), Ирландском национальном университете, исследовательских подразделениях концерна «Philips» (Эйндховен, Голландия), Университете Северной Каролины (Рейли, США), Университете Стоун-Брук (Нью-Йорк, США), университете г. Нью-Йорк (США), университетах Болгарии, Вьетнама, Гвинеи, Гвинеи-Бисау, Иордании, Ирака, Ливии, Монголии, Сирии. Школа насчитывает более 20 докторов и 100 кандидатов наук.



В. С. Просолович — заведующий НИЛ спектроскопии полупроводников

Штатный коллектив кафедры физики полупроводников и наноэлектроники включает в себя исследователей, имеющих достаточный научный опыт и владеющих современными теоретическими и экспериментальными методами исследования. На кафедре функционируют четыре научно-исследовательские лаборатории (НИЛ спектроскопии полупроводников (заведующий лабораторией В. С. Просолович), НИЛ физики электронных материалов (заведующий лабораторией В. К. Ксенович), НИЛ физики и техники полупроводников (заведующий лабораторией И. И. Азарко), НИЛ высокоэнергетичной ионной имплантации и функциональной



Проректор по учебной работе БГУ А. Л. Толстик (слева) и заведующий НИЛ высокоэнергетичной ионной имплантации и функциональной диагностики Н. М. Казючиц за обсуждением плана работ с представителями Министерства обороны. 2010 г.



И. И. Азарко — заведующий
НИЛ физики и техники
полупроводников

диагностики (заведующий лабораторией Н. М. Казючиц)) и студенческая научно-исследовательская лаборатория (научный руководитель М. Г. Лукашевич).

Научный коллектив характеризуется высокой степенью сбалансированности исследователей, работающих в смежных областях физики полупроводников и диэлектриков, радиационной физики конденсированных сред, физики низкоразмерных систем и углеродных материалов. Это позволяет решать широкий круг задач, требующих участия высококвалифицированных специалистов, имеющих достаточный экспериментальный опыт и прочную теоретическую базу.

На кафедре интенсивно разрабатываются новые методы исследова-

ний и создается оригинальное диагностическое оборудование для оснащения лабораторий БГУ и научно-исследовательских структур промышленных предприятий, в том числе проводятся исследования, направленные на совершенствование и разработку новых типов приборов и материалов электроники. Мировую известность и распространение получили разработанные на кафедре фотоэлектрические методы, методики фото- и электролюминесценции, ИК-поглощения, ЭПР-спектроскопии, пьезоспектроскопии, прецизионной рентгеновской дифрактометрии, туннельной спектроскопии и спектроскопии горячих электронов, стационарной и импульсной радиоспектроскопии, гальваномангнитных и криоэлектронных измерений, научное и промышленное оборудование.

На базе кафедры проводятся международные научные конференции, организуются совместные научно-практические совещания с коллегами из вузов республики, ближнего и дальнего зарубежья. На кафедре постоянно проводятся научные семинары, в том числе с участием сотрудников НАН Беларуси, ОАО «Интеграл» — управляющей компании холдинга «Интеграл», НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко и НИИ ядерных проблем. Только за период 2005–2015 гг. сотрудниками кафедры опубликовано 5 монографий, 6 учебных пособий, 370 статей в научных журналах,



А. И. Сягло (слева) и Е. Ф. Кисляков (справа). 2010 г.

335 докладов и более 200 тезисов докладов на научных конференциях. При активном участии сотрудников кафедры подготовлено к изданию 5 сборников материалов конференций.

Сотрудники кафедры принимают участие в работе оргкомитетов международных научных конференций, проводимых как в республике, так и за рубежом. Раз в два года кафедра проводит Международную научную конференцию «Материалы и структуры современной электроники» (в 2016 г. готовится 7-я конференция).

Благодаря сотрудничеству с предприятиями и организациями Республики Беларусь у кафедры имеются производственно-технологические возможности для создания полупроводниковых структур (ОАО «Интеграл»), синтеза сверхтвердых материалов (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению), обработки сверхтвердых материалов (Гомельское ПО «Кристалл», ЗАО «БелГРАН»), синтеза композиционных материалов (химический факультет БГУ), дополненные соответствующим технологическим и исследовательским оборудованием кафедры. Можно привести несколько примеров освоения в производстве и учебном процессе результатов научных исследований.

В рамках совместного проекта на производственном участке лаборатории физики высоких давлений и сверхтвердых материалов НПЦ НАН Беларуси по материаловедению осваиваются четыре технологии синтеза сверхтвердых материалов; технологический процесс формирования силицидных и полицидных структур тугоплавких металлов для низкопороговых и сверхбыстродействующих

ИМС различного назначения внедрен в ОАО «Интеграл». Для УП «Минский НИИ радиоматериалов» изготовлены 2 установки для измерения спектральных характеристик.

Результаты разработок сотрудников кафедры активно используются на заводе полупроводниковых приборов (филиал ОАО «Интеграл»). Применение в производстве разработанного метода геттерирования неконтролируемых примесей позволило увеличить коэффициент усиления биполярного $n-p-n$ -транзистора и повысить выход годных изделий.

Для ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова» для проведения испытания изготовлена серия алмазных чувствительных элементов в качестве дозиметров импульсных ионизирующих излучений.

Цели и задачи коллектива кафедры в области научной деятельности тесно связаны с повышением качественного уровня подготовки студентов, магистрантов, аспирантов и докторантов на базе выполняемых научных исследований, а также с ускорением практической реализации научных и научно-технических результатов.

В рамках СНИЛ кафедры студенты работают над курсовыми и дипломными проектами. При этом результаты их работы нередко отмечаются различными наградами, в том числе дипломами на международных форумах молодых исследователей и на республиканских конкурсах, стипендией Международного Алфёровского фонда поддержки образования и науки, грантами Министерства образования для студентов, магистрантов, аспирантов.

Ежегодно разработки сотрудников кафедры внедряются в учебный и технологический процесс. Так, за последние 10 лет внедрено 16 разработок: например, результаты выполнения задания отраслевой научно-технической программы «Учебно-научный комплекс» используются в учебном процессе.

Сотрудники кафедры обеспечивают выполнение работ в области физики низкоразмерных систем, физики и технологии полупроводников, химии и технологии углеродных материалов на высоком научном уровне. Работая в международных научных центрах, они осваивают самые современные методы исследования и технические операции. Кроме того, в рамках осуществляемого сотрудничества при выполнении отдельных работ в зарубежных научных центрах имеется возможность использования уникального оборудования.

Коллектив кафедры сотрудничает с Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария); физическим факультетом Политехнического института г. Лозанна, Швейцария (совместные

европейские проекты); факультетом физики и астрономии Рурского университета г. Бохум, Германия (научные стажировки в рамках договора о межуниверситетском сотрудничестве, совместные работы); Институтом физики Университета И.-В. Гёте г. Франкфурт-на-Майне, Германия (научные стажировки, совместные работы); LNCMI – научно-исследовательским центром г. Тулуза; Лабораторией сильных магнитных полей, Франция (научные стажировки, совместные проекты, работы и руководство диссертационной работой аспиранта БГУ); Институтом радиотехники и электроники РАН г. Фрязино, Российская Федерация (договор о сотрудничестве, совместные работы); Королевским технологическим институтом г. Стокгольм, Швеция (совместный европейский проект); Институтом физики полупроводников Центра физических наук и технологии г. Вильнюс, Литва (научные стажировки, совместные международные проекты и работы); Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе г. Санкт-Петербург, Российская Федерация (договор о сотрудничестве, совместные работы); Институтом спектроскопии РАН г. Троицк, Российская Федерация (договор о сотрудничестве, совместные проекты и работы); Объединенным институтом ядерных исследований РАН г. Дубна, Российская Федерация (совместные проекты и работы); Монгольским национальным университетом (совместные проекты и работы, руководство диссертационной работой аспирантки МНУ); Институтом физики АН Вьетнама (совместные проекты и работы).



Слева направо: В. В. Петров, Н. А. Поклонский и заведующий кафедрой физической оптики А. А. Минько. 2015 г.

На кафедре физики полупроводников и наноэлектроники постоянно работает научный семинар, объединяющий всех специалистов белорусской научной школы «Физика и техника полупроводников», которая сегодня представляет собой интеллектуальную основу полупроводниковой электроники и микроэлектроники и способствует успешному развитию полупроводникового производства в республике. Подтверждением эффективного функционирования научной школы является большое количество научных сотрудников, аспирантов и преподавателей, защитивших диссертации на соискание степеней доктора и кандидата наук.

Доктора наук

В. Д. Ткачёв

С. В. Гапоненко

Л. В. Говор

О. К. Гусев

Д. С. Доманевский

О. П. Ермолаев

П. В. Жуковский

А. М. Зайцев

Ч. Карват

П. В. Кучинский

В. М. Ломако

М. Г. Лукашевич

В. Б. Оджаев

Я. Партыка

В. П. Пархутик

А. А. Патрин

В. В. Петров

В. А. Пилипенко

Н. А. Поклонский

Г. Г. Федорук

А. К. Федотов

А. Р. Челябинский

В. Б. Яржембицкий

Кандидаты наук

Абдул-Муним Абид

И. И. Азарко

Н. И. Акулович

Б. Арнаутов

В. Г. Баев

А. И. Боуба

Д. И. Бринкевич

Ю. А. Бумай

А. В. Бураков

В. А. Быковский

С. А. Вабищевич

В. С. Вариченко

В. А. Вилькоцкий

В. С. Волобуев

Во Куанг Нья

Е. В. Мельникова

Н. С. Минаев

А. В. Мудрый

Л. И. Мурин

Нажим Фирас

Нгуен Нгок Хиеу

А. В. Новик

А. М. Новосёлов

Г. В. Пальчик

А. Н. Петух

Ю. М. Покатило

О. Н. Поклонская

В. Н. Пономарь

В. Н. Попок

В. С. Просолович

С. А. Вырко
Галимансээ Шилагарди
Н. Ф. Голубев
Н. И. Горбачук
Джадан Муханнат
Диало Амаду Диухе
В. П. Доброго
Т. А. Довженко
Н. И. Долгих
В. А. Доросинец
Н. А. Дроздов
Д. П. Ерчак
А. Н. Жевно
А. Г. Захаров
Ю. М. Ильяшук
Л. А. Казакевич
Р. Каканаков
Камара Сануси
И. А. Карпович
Е. Ф. Кисляков
Б. В. Климкович
И. П. Козлов
Е. И. Козлова
Т. И. Кольченко
В. К. Ксеневиц
В. И. Кузнецов
М. Т. Лаппо
Н. М. Лапчук
Я. И. Латушко
А. В. Латышев
Ле Ханг Ха
А. Г. Литвинко
В. В. Литвинов
П. Ф. Лугаков
Т. А. Лукашевич
В. В. Лукьяница
Л. Ф. Макаренко
В. П. Маркевич
В. А. Мартинович

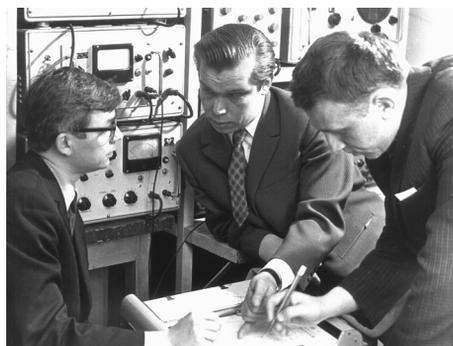
А. А. Мельников
А. С. Рухленко
Самбуу Мунхцэцэг
В. А. Самуйлов
Секу Кааба
Селам Дауд Мохамед
С. П. Сернов
Н. А. Соболев
В. И. Сопряков
Н. Станев
В. Ф. Стельмах
Л. В. Стригуцкий
Ю. Р. Супрун-Белевич
В. А. Суслов
А. И. Сягло
М. И. Тарасик
В. П. Толстых
В. И. Уренёв
В. И. Утенко
Фан Тхань Дау
Хаки Исмаил Хаки Тахер
А. А. Харченко
Г. Хельцер
Хосе Ривера Араика
Хо Фьюк Хоай
В. В. Чёрный
Л. И. Шадурская
Г. М. Шахлевиц
Ю. А. Шостак
С. В. Шпаковский
К. Шредель
Е. Н. Шумская
В. В. Шуша
А. В. Юхневич
В. Ю. Явид
С. Якимова
С. Н. Якубеня
О. Н. Янковский
А. М. Янченко

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Н. М. Лапчук, Н. И. Горбачук, Т. М. Лапчук

В начале 1960-х гг. развитие в Беларуси электронной промышленности потребовало обеспечения ее высококвалифицированными специалистами по физике и технике полупроводников для научно-исследовательской, производственной и педагогической деятельности. В 1966 г. на основе проблемной лаборатории полупроводниковой техники была создана кафедра физики полупроводников Белорусского государственного университета и началась подготовка студентов по специализации «Физика полупроводников и диэлектриков», что обеспечило условия для формирования научной школы в этом направлении. Кафедру возглавил В. Д. Ткачѳв.

Первыми ее сотрудниками были: В. А. Вилькоцкий, Д. С. Доманевский, А. Н. Жевно, В. А. Жидович, Е. Е. Калмыков, Н. А. Кобец, И. П. Козлов, Т. И. Кольченко, М. Т. Лаппо, А. Г. Литвинко, В. М. Ломако, П. Ф. Лугаков, С. В. Мишук, А. А. Патрин, П. С. Соловьѳв, В. Ф. Стельмах, В. И. Уренѳв, А. В. Юхневич. Работа по подготовке кадров проводилась параллельно с научно-исследовательской деятельностью. Уже в 1967 г. на кафедре были защищены первые дипломные работы.



В. Д. Ткачѳв (в центре), В. И. Уренѳв (справа) и А. В. Юхневич (слева) за обсуждением результатов исследований

В конце 1970-х и в 1980-х гг. НПО «Интеграл» входило в число наиболее интенсивно развивающихся предприятий электронной промышленности в СССР. Соответственно, расширялось сотрудничество между кафедрой и предприятиями НПО. В 1979 г. на базе кафедры было создано учебно-научно-производственное объединение «БГУ – Интеграл» – филиал кафедры на производстве, начата подготовка студентов по специальности «Микроэлектроника». Лекции

студентам кафедры читали ведущие специалисты НПО «Интеграл»: М. М. Бобровницкий, В. Я. Красницкий, Ю. И. Савотин, А. И. Сухопаров. В настоящее время связь с ОАО «Интеграл» – управляющей компанией холдинга «Интеграл» – курирует член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор В. А. Пилипенко, который проводит занятия со студентами кафедры непосредственно на предприятии, участвует в реализации совместных научно-технических проектов.

В 2015 г. при участии В. А. Пилипенко продлен договор о сотрудничестве между Белорусским государственным университетом и ОАО «Интеграл» – управляющей компанией холдинга «Интеграл» – в части взаимодействия в научно-производственной и научно-технологической сферах, включая повышение эффективности подготовки специалистов с высшим образованием кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники с учетом особенностей производства.



Обсуждение результатов измерений параметров полупроводниковых материалов и приборов при криогенных температурах при выполнении научно-исследовательских работ под руководством В. Д. Ткачёва, В. М. Ломако, В. П. Доброго и П. Ф. Лугакова



Слева направо: А. В. Юхневич, Д. С. Доманевский и В. Ф. Стельмах с выпускниками кафедры. 1971 г.



А. Г. Литвинко (слева), П. Ф. Лукаков (справа). 1971 г.



Т. И. Кольченко (*справа*) и В. П. Доброго (*слева*)
со студентами кафедры. 1974 г.



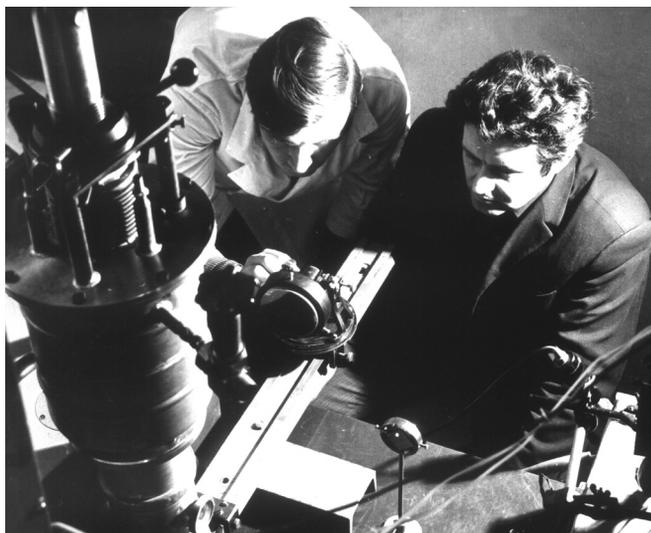
Н. А. Дроздов (*слева*) и А. А. Патрин (*справа*)
со студенткой из Вьетнама. 1975 г.



И. П. Козлов исследует спектральные характеристики кремния. 1975 г.



Лабораторный практикум
по физике полупроводниковых материалов. 1978 г.



Д. С. Доманевский и аспирант В. А. Быковский
за сборкой и наладкой научного оборудования. 1980 г.



На лабораторном практикуме
по физике полупроводниковых приборов. 1980 г.



В. П. Доброго (на переднем плане) с учениками
Л. В. Говором (слева) и О. П. Ермолаевым (справа). 1983 г.



А. М. Янченко со студентами кафедры. 1985 г.



БЕЛАРУСКИ
Дзяржаўны ўніверсітэт

ЗАГАД

04.08.2002 № 145-072

о переименовании кафедры
на физическом факультете

На основании решения Ученого совета университета от 30.05.2002 г. (протокол № 24)

П Р И К А З Ы В А Ю:

1. Переименовать с 1 сентября 2002 г. кафедру физики полупроводников физического факультета в кафедру физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.
2. Перевести сотрудников кафедры физики полупроводников физического факультета с 01.09.2002 г. на кафедру физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета с сохранением должностей, срока избрания по конкурсу, срока работы, должностных окладов, доплат, надбавок, повышающих коэффициентов.
3. Главному управлению планирования, бухгалтерского учета и финансов (Солодуха В.П.) внести изменение в штатное расписание физического факультета.
4. Управлению кадров (Климковичу О.Д.) осуществить перевод сотрудников физического факультета в установленном порядке.

**Ректор
профессор**

А.В.Козулин

Согласовано:

/ Начальник ГУПБУиФ

В.П.Солодуха

Начальник Главного управления
учебной и научно-методической работы

В.В.Самохвал

Начальник Управления кадров

О.Д.Климкович

Начальник Управления правовой работы

Е.Н.Швакова

Декан физического факультета

В.М.Анишич

Начальник управления организационной
работы и документного обеспечения

В.Я.Полещенко

Материал отнесен
по работе
с документами
Е.И.Зинкевич

Приказ о переименовании кафедры физики полупроводников
в кафедру физики полупроводников и наноэлектроники
физического факультета БГУ



В. Б. Оджаев проводит заседание кафедры. 2014 г.

Подготовка студентов, поступающих на кафедру по конкурсу для специализации, велась на дневной и вечерней формах обучения по двум специальностям на всех курсах (до 160 человек).

Успехи, достигнутые сотрудниками кафедры в области физики низкоразмерных структур, нанотехнологии и нанoeлектроники, а также современные тенденции в развитии науки и техники вызвали необходимость уточнения названия кафедры. Начиная с сентября 2002 г. кафедра стала называться кафедрой физики полупроводников и нанoeлектроники.

За 50 лет существования кафедры физики полупроводников белорусские научно-исследовательские институты и промышленные предприятия получили свыше тысячи молодых высококвалифицированных специалистов.

Многие выпускники кафедры, работающие за пределами Беларуси, руководят научными группами, занимающимися физикой полупроводников и электроникой наноструктур: Л. В. Говор (Германия), П. В. Жуковский (Польша), А. М. Зайцев (США), А. А. Мельников (Канада), А. А. Патрин (Польша), В. Н. Попок (Швеция), В. А. Самуйлов (США) [1].

В настоящее время на кафедре работают 11 преподавателей, в том числе 6 кандидатов и 5 докторов наук, среди них 1 член-корреспондент НАН Беларуси, 4 профессора и 6 доцентов. Заведующим кафедрой с 2002 г. является В. Б. Оджаев.

В 2008 г. коллектив преподавателей: профессор В. Б. Оджаев, профессор Н. А. Поклонский, профессор Д. В. Свиридов, доцент Н. М. Лапчук – за цикл работ «Структурированные углеродные материалы: кластеры, нанотрубки, ионно-имплантированные полимеры и алмазы» был награжден премией им. А. Н. Севченко.



Профессор М. Г. Лукашевич. 2011 г.

Сегодня на кафедре ведется подготовка более 50 студентов, магистрантов и аспирантов по специализациям:

1-31 04 01-01 06 «Физика полупроводников и диэлектриков»;

1-31 04 01-02 14 «Микроэлектроника»;

1-31 04 01-06 35 «Нанoeлектроника»;

1-31 04 01-04 17 «Новые материалы и технологии».

Основные лекционные курсы

Специализация «Физика полупроводников и диэлектриков»:

- введение в физику конденсированного состояния;
- физика полупроводников;
- основы науки о материалах и технологиях;
- электронные состояния и процессы в конденсированных средах;
- статистическая физика полупроводников;
- генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках;
- физика и технология полупроводниковых приборов;
- цифровая и аналоговая схемотехника;
- ионно-радиационные методы модификации материалов;
- современные методы исследования конденсированных материалов;
- низкоразмерные системы.



Профессор Н. А. Поклонский на лекции. 2015 г.



В. А. Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси



В. И. Яшкин – кандидат физико-математических наук, доцент

Специализация «Микроэлектроника»:

- электронное материаловедение;
- введение в физику полупроводников;
- материалы и технологии в электронике;
- основы электронной теории твердых тел;
- равновесные состояния в кристаллах;
- основы полупроводниковой схемотехники;
- неравновесные процессы в полупроводниках;



Профессор В. В. Петров. 2016 г.

- физика полупроводниковых приборов;
- измерения параметров полупроводниковых структур;
- технология производства интегральных микросхем;
- моделирование технологических процессов в микроэлектронике;
- электроника наноструктур.

Специализация «Новые материалы и технологии»:

- введение в физику твердого тела;
- основы физики и технологии полупроводников;
- новые материалы в электронике;
- перспективные направления развития физики полупроводников и нанoeлектроники;
- организация производственной и научной деятельности;
- микротехнологии в полупроводниковой электронике;
- тенденции в развитии электроники и электронной промышленности.

Специализация «Нанoeлектроника»:

- материалы микро- и нанoeлектроники;
- введение в физику полупроводников и диэлектриков;
- нанотехнологии в электронике;
- электронная теория полупроводников;
- квазичастицы в кристаллах и низкоразмерных системах;
- полупроводниковые приборы: неравновесные процессы;
- схемотехника и введение в технику микроконтроллерных систем;



Заседание кафедры физики полупроводников:
крайний справа – В. Ф. Стельмах (заведующий кафедрой с 1981 по 1998 г.);
слева направо: 1-й ряд – А. Р. Челядинский, А. А. Патрин, В. П. Доброго,
И. П. Козлов; *2-й ряд* – С. Н. Якубеня, Н. А. Дроздов, А. К. Федотов,
В. П. Толстых; *3-й ряд* – А. Н. Жевно, М. И. Тарасик, М. Г. Лукашевич,
Н. М. Лапчук. 1985 г.

- измерения параметров полупроводниковых структур;
- программирование микроконтроллерных систем;
- тенденции в развитии электроники и электронной промышленности;
- электроника наноструктур;
- спинтроника.

Непрерывно совершенствуется учебный процесс. Преподавателями кафедры разрабатываются новые спецкурсы, ежегодно пересматривается и обновляется содержание традиционных спецкурсов. Особое внимание уделяется созданию условий для эффективной самостоятельной работы студентов. В 2010 г. для контроля знаний доцентом В. Ю. Явидом впервые на кафедре было внедрено и до сего дня активно используется компьютерное тестирование по спецкурсам «Физика и технология полупроводниковых приборов» и «Физика полупроводниковых приборов: неравновесные процессы».

По основным спецкурсам подготовлены учебно-методические комплексы, идет модернизация и обновление учебного лабораторного практикума кафедры. Изготовлен и внедрен в образовательный процесс учебно-научный комплекс для изучения физических свойств полупроводниковых материалов и наноструктур.

Развитие современной элементной базы компьютерной техники и расширение функциональных возможностей микроконтроллеров позволяют совершенствовать методы проведения лабораторных измерений и выполнять регистрацию результатов измерений в удобном виде для последующей визуальной и компьютерной обработки. Так, например, на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники разработана лабораторная установка для бесконтактного исследования и последующего компьютерного анализа распределения эффективного времени жизни неравновесных носителей



В. Ю. Явид, 2008 г.

заряда в пластинах кремния. Измерительная установка может быть использована для входного и выходного контроля кремниевых пластин, отладки и периодического контроля качества технологии производства дискретных полупроводниковых приборов и микросхем [2].

На кафедре разработан цикл лабораторных работ, предназначенный для студентов университетов, специализирующихся в области физики конденсированного состояния, физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники, который также может быть использован при повышении квалификации инженерно-технического персонала предприятий микроэлектронной промышленности [2].

Студент кафедры изучает новую лабораторную установку для бесконтактного исследования и последующего компьютерного анализа распределения эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда в пластинах кремния. 2011 г.





И. А. Карпович. 2012 г.



Студенты 5-го курса в лаборатории «Современные методы исследования полупроводниковых материалов и наноструктур». 2014 г.



Серийные измерители импеданса: E7-12, E7-14
(производство УП «Минский завод "Калибр"») и малогабаритная зондовая головка (разработка БГУ)

Организована кафедральная медиатека, в которой представлены электронные версии учебно-методических комплексов, подборка учебных пособий и научных статей по физике полупроводников. Кроме основательной подготовки по современным направлениям физики полупроводников, микроэлектроники, технологиям и перспективным материалам студенты получают знания по инженерной графике, информатике, компьютерной технике, экономике и маркетингу, принципам бездефектного производства.

Учебная и научно-исследовательская деятельность студентов и преподавателей успешно осуществляется на кафедре благодаря работе учебно-вспомогательного персонала. Необходимо вспомнить первых заведующих учебными лабораториями: Евгения Анатольевича Котова, Владимира Антоновича Жидовича, Виктора Анатольевича Гришанова, Петра Сазоновича Соловьёва. В настоящее время учебными лабораториями заведует Татьяна Михайловна Лапчук.

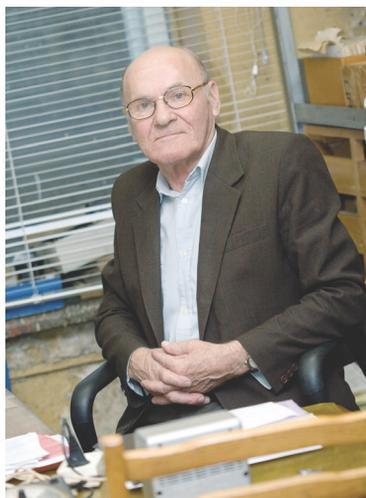
Материально-техническую базу кафедры с первых дней ее образования поддерживал Александр Данилович Наумовец, дело которого принял Вячеслав Алексеевич Семёнов. В. А. Семёнов имеет огромный инженерно-конструкторский опыт работы с радиотехникой – от ламповых



П. С. Соловьёв — мастер «золотые руки». 1976 г.



Заведующий учебной
лабораторией
Т. М. Лапчук. 2008 г.



А. Д. Наумов. 2008 г.

приборов до микропроцессорных систем Алексеевич – незаменимый сотрудник в учебном процессе, так как успешно справляется с ролью «скорой помощи» в реанимации приборов лабораторного практикума и сложного научного оборудования. Все новаторские идеи В. А. Семёнова, касающиеся замены старого и внедрения нового оборудования в учебные лаборатории кафедры, имеют право на жизнь.



В. А. Семёнов. 2015 г.

В 1980–90-х гг. разработчиками новых лабораторных работ были выпускники кафедры: Леонид Владимирович Цвирко, Владимир Ильич Курганский и Сергей Васильевич Поляруш. Внедренные в учебный процесс, эти работы до сих пор сохраняют свою актуальность. Так, универсальный прибор «Фонон» для изучения вольт-амперных характеристик $p-n$ -переходов, разработанный В. И. Курган-



В. И. Курганский – инженер-разработчик учебного оборудования кафедры. 1989 г.

ским, позволяет испытывать полупроводниковые приборы в широком диапазоне температур.

За время существования кафедры ее секретарями были Галина Леонидовна Лебедева, Алла Александровна Дутко, Ирина Андреевна Анурьева. Сегодня эту должность занимает Тамара Дмитриевна Харченко.

На кафедре работает студенческая научно-исследовательская лаборатория «Физика наноструктурированных полупроводников», в рамках которой каждый

год выполняются одна-две студенческие исследовательские работы. Студентами-магистрантами и аспирантами кафедры ежегодно публикуется около 30 научных работ, делается 5–10 докладов на международных и республиканских научных конференциях. Студенты кафедры активно участвуют в ежегодной научной конференции студентов и аспирантов БГУ, в рамках которой традиционно работает отдельная секция физики полупроводников.

На кафедре успешно обучаются иностранные студенты. Никто из них не завершил обучение на кафедре с плохим учебным и личностным результатом. При этом следует отметить важную роль преподавательского коллектива, доброжелательную атмосферу на кафедре по отношению к иностранным студентам и аспирантам. Учитывая позитивный психологический климат, складывающийся в процессе обучения иностранных студентов, можно с уверенностью говорить об успешной адаптации иностранных студентов на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники.

Традиционной формой международного сотрудничества является подготовка кадров высшей квалификации для иностранных государств, в том числе в магистратуре и аспирантуре БГУ, что служит важнейшим показателем качества и эффективности образо-



Т. Д. Харченко – секретарь кафедры. 2006 г.



Н. И. Горбачук
и его ученица из Вьетнама
Нгуен Тхи Тхань Бинь. 2014 г.

вательной деятельности вуза, признанием его престижа на национальном и международном уровнях. Наиболее активно международное сотрудничество развивается со странами Ближнего Востока и Китая.

Первым иностранным аспирантом, защитившим в 1968 г. диссертацию на кафедре, был Галимансээ Шилагарди. Он работал вместе с В. И. Уренёвым под руководством В. Д. Ткачёва. В 2015 г. Г. Шилагарди отметил свой 80-летний юбилей, он любит Беларусь и все так же плодотворно сотрудничает с кафедрой, работая над совместными проектами по исследованию углеродных низко-размерных структур и бурых углей.

За последние десять лет на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники успешно закончили магистратуру, а также аспирантуру и защитили диссертации иностранные соискатели из Монголии, Ирака и Вьетнама.



Галимансээ Шилагарди — первый иностранный аспирант кафедры, профессор Монгольского национального университета

Следует отметить, что студенты из Вьетнама, получившие диплом магистра, обращаются на кафедру с просьбой принять их в аспирантуру для продолжения работы над научными направлениями, разрабатываемыми в их магистерских диссертациях. Такие же заявки поступают из Монголии и Ирака, т. е. из тех стран, для которых подготовлены или готовятся кадры высшей квалификации. Это является ярким свидетельством того, что интеллектуальный потенциал и опыт в подготовке высококвалифицированных специалистов на кафедре – конкурентоспособный «товар» на мировом рынке [3].

Благодаря установившимся учебно-научным связям с университетами и институтами России, Украины, США, Великобритании, Чехии, Польши, Австрии, Болгарии, Канады, Германии имеются широкие возможности для стажировок и выполнения дипломных работ, проведения совместных исследований, взаимного обмена студентами и научными сотрудниками. Выпускники кафедры распределяются на работу в институты НАН Беларуси (Институт физики твердого тела и полупроводников, Институт физики им. Б. И. Степанова, Институт атомной и молекулярной физики,



Выпускники кафедры Нгуен Тхи Тхуй Ньонг и Нгуен Ван Тоан с однокурсниками и преподавателями. 2010 г.



Аспиранты кафедры
Хиеу Нгуен Нгок (Вьетнам)
и Самбуу Мунхцэцэг (Монголия)
с научным руководителем
Н. А. Поклонским



Сотрудники кафедры физики полупроводников
и нанoeлектроники. 2015 г.

Институт электроники); Минский НИИ радиоматериалов; на НПО «Интеграл» (включающее заводы «Цветотрон» (г. Брест) и «Камертон» (г. Пинск)); ПО «Горизонт», концерн «Планар», ПО «Витязь» (г. Витебск) и другие предприятия, занимающиеся выпуском наукоемкой продукции (УП «Адамас БГУ», ЗАО «БМЦ»), вузы республики (БГУ, БНТУ, БГТУ, ГрГУ им. Янки Купалы, ГомГУ им. Франциска Скорины), колледжи. Как правило, не менее 10–15 % выпускников кафедры продолжают обучение в магистратуре и аспирантуре при БГУ, а также при институтах НАН Беларуси [1].



Заведующий кафедрой В. Б. Оджеев вручает диплом студенту. 2014 г.

Ежегодно кафедра выпускает около 20 дипломированных специалистов. Выпускники получают квалификацию «Физик. Исследователь», «Физик. Инженер», «Физик. Менеджер», что позволяет им успешно работать и за рубежом: в Щецинском университете (Польша); Люблинском техническом университете (Польша); Кошалинском техническом университете (Польша); Рурском университете (Бохум, Германия); университете г. Ульм (Германия); Ольденбургском университете (Германия); Техническом университете Чалмерса (Гетеборг, Швеция); Технологическом институте Корка (Корк, Ирландия); исследовательских подразделениях концерна «Philips» (Эйндховен, Голландия); Университете Северной Каролины (Рейли, США); Университете Стоуни-Брук (Нью-Йорк, США); Университете



Рабочее совещание с немецкими коллегами
(*третий слева – Н. М. Казючиц*). 2008 г.

г. Нью-Йорк (США); университетах Болгарии, Вьетнама, Гвинеи, Гвинеи Бисау, Иордании, Ирака, Ливии, Монголии, Сирии [1].

За время существования кафедры закончили аспирантуру и защитили кандидатские диссертации более 100 человек, а более 20 из них стали докторами наук.

Библиографические ссылки

1. *Поклонский Н. А., Стельмах В. Ф., Ёрбачук Н. И.* Сорок лет кафедре физики полупроводников и наноэлектроники БГУ // *Материалы и структуры современной электроники* : сб. науч. тр. II Междунар. науч. конф., Минск, 5–6 окт. 2006 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2006. С. 5–19.

2. *Автоматизация измерений в лабораторном практикуме* / И. А. Карлович [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники* : сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2008. С. 274–275.

3. *Особенности подготовки иностранных студентов и аспирантов на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники* / В. Б. Оджаев [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники* : сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф., Минск, 23–24 сент. 2010 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. Минск, 2010. С. 227–229.

ИНТЕРВЬЮ
С ВЫПУСКНИКАМИ
КАФЕДРЫ

1. *Какое самое яркое впечатление, связанное с кафедрой, сохранилось в Вашей памяти?*
2. *Какие из приобретенных на кафедре навыков или знанийгодились Вам в работе и/или жизни?*
3. *Ваш совет или пожелание нынешним и будущим студентам, магистрантам, аспирантам и сотрудникам кафедры.*

Сергей Васильевич ГАПОНЕНКО

(председатель научного совета Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор).

1. Самое яркое и устойчивое впечатление – это дух сотрудничества преподавателей и студентов. Часто и с особой теплотой вспоминаю Виктора Петровича Доброго, Валерия Ивановича Уренёва, Алексея Алексеевича Патрина, Вячеслава Фомича Стельмаха, читавших нам первые спецкурсы. Мне не удалось пообщаться с Валентином Дмитриевичем Ткачёвым: он не читал нам спецкурсов, в то время он уже возглавлял Белорусский политехнический институт и превращал его в полноценный технический университет. Но один эпизод запомнился на всю жизнь. Я работал со студенческих лет в Институте физики АН БССР и учился в аспирантуре этого института. Однако диссертация была написана по физике полупроводников (оптические свойства селенида цинка и стекло, содержащих полупроводниковые микрокристаллы) и, так как в Академии наук в то время не было ни одного совета по защитам диссертаций в области физики полупроводников, я принес диссертацию в БГУ. По правилам диссертация до принятия к защите должна была пройти обсуждение на профильной кафедре, т. е. на моей «родной» кафедре полупроводников. Ее к тому времени уже возглавлял Вячеслав Фомич Стельмах. На семинаре я чувствовал себя выпускником кафедры, пришедшим отчитываться за то, что сделал в науке после окончания кафедры. Естественно, я волновался, очень волновался. Семинар начался под руководством В. Ф. Стельмаха, однако примерно через пять минут с шумом распахнулась дверь и в аудиторию буквально влетел В. Д. Ткачёв в сопровождении 25 студентов 3-го курса. Он, будучи ректором Политехнического института, продолжал читать лекции на нашей кафедре и, увидев объявление о семинаре по обсуждению моей диссертации, привел всю группу с собой. Вя-



чеслав Фомич уступил ему право ведения семинара, и, таким образом, «экзамен» я сдавал В. Д. Ткачёву, который меня совсем не знал. Тема исследования и результаты ему понравились, он прочитал нам всем небольшую лекцию о дефектах в кристаллах и подчеркнул для студентов важность и перспективность работы на стыке направлений. Один из них потом попросился к нам в лабораторию и успешно защитил диссертацию. Дух творчества и сотрудничества – вот самые яркие впечатления.

2. Современные научные направления рождаются на стыке нескольких разделов или даже областей науки. Моя научная деятельность связана с оптикой полупроводников, исследованием их свойств лазерными методами, анализом квантовых размерных эффектов и их оптических проявлений в полупроводниковых наноструктурах, переносом явлений из физики полупроводников в оптику (электромагнитные волны и электроны описываются математически идентичными дифференциальными уравнениями). Физика полупроводников здесь первична, она дополняется оптикой, лазерной физикой, квантовой механикой и электродинамикой. Я мечтал работать в Институте физики Академии наук Беларуси, однако исходный интерес к физике был связан со школьным увлечением электроникой. С младших курсов я проводил много времени в лаборатории Виктора Павловича Грибковского, и когда встал вопрос о выборе кафедры, он сказал: «Однозначно рекомендую Вам кафедру полупроводников. Вы получите базовое образование в этой области. А технику оптических экспериментов и лазерной спектроскопии освоите в лаборатории института». Этот совет оказался абсолютно верным. Базовое образование, полученное на кафедре, и дополнительные знания, приобретенные в процессе работы и многолетнего пребывания в «оптической» научной среде, позволили мне достаточно уверенно чувствовать себя в таких областях, как оптические триггеры (1980-е годы), оптика наноструктур (1990-е) и нанофотоника (наше время).

3. Студентам. Ловите каждое слово преподавателя, поймите, что лишних знаний не бывает и часто в жизни полезным оказывается то, что в студенческие годы казалось не очень интересным и бесполезным. Магистрантам и аспирантам. Не бойтесь браться за трудные задачи, работайте на стыке направлений (это особенно важно в условиях ограниченных финансовых ресурсов на поддержку исследований), максимально используйте интеллектуальный потенциал кафедры. Сотрудникам. Укрепляйте на кафедре дух творчества и сотрудничества преподавателей и студентов.

Леонид Владимирович ГОВОР

(профессор, Ольденбургский университет, Германия).

1. Самые яркие впечатления оставила научно-творческая и социальная атмосфера на кафедре. Запомнились очень живые, доброжелательные и в то же время принципиальные научные дискуссии на семинарах и докладах. А проводимые на кафедре различные социальные мероприятия объединяли сотрудников, разных по возрасту и должности, в единый, достаточно крепкий коллектив.

2. Я считаю, мне очень повезло, что свою трудовую деятельность на кафедре я начал под руководством Виктора Петровича Доброго, прекрасного физика и тонкого, интеллигентного человека. Он научил меня обращать внимание на побочные эффекты, проявляющиеся при измерении тех или иных физических параметров во время эксперимента, серьезно их исследовать простыми методами, анализировать и искать им объяснение. Такой подход оказался очень плодотворным в моей дальнейшей научной карьере и стал одним из главных инструментов получения надежных научных результатов, помогающих лучше понять физику полупроводников.

3. Студентам, магистрантам и аспирантам желаю неуклонно следовать своему призванию, невзирая на временные неудачи, и помнить, что физика – наука кропотливая, требующая большой отдачи сил и времени. Всем сотрудникам желаю новых интересных идей, творческих успехов и благополучия.





Олег Константинович ГУСЕВ

(проректор Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор).

1. 1974 год, 2-й курс, экскурсия на кафедру физики полупроводников в связи с предстоящим распределением на выпускающую кафедру. В одной из лабораторий В. Ф. Стельмах рассказывал о физических принципах, на основе которых в недалеком будущем будут созданы приборы, работающие на эффектах взаимодействия

отдельных электронов с отдельными ядрами атомов, а их размеры будут соизмеримы с размерами атомов. И показывал это на пальцах. Это было фантастично, а Вячеслав Фомич рассказывал просто, понятно, интересно, захватывающе. Я сразу сделал выбор и записался на кафедру физики полупроводников.

2. И учителя (В. Б. Яржембицкий, А. В. Мудрый, Д. С. Доманевский, А. А. Патрин, В. И. Уренёв, И. П. Козлов, В. П. Доброго), и сам процесс обучения требовали, чтобы студент постоянно думал и работал. Это и просто, и сложно. Так получилось, что по жизни пришлось все время думать и работать. А этому был обучен и к этому привык.

3. Студентам, магистрантам, аспирантам.

Вы сделали правильный выбор, перед вами одна из самых интересных и захватывающих областей науки и техники. Не упустите свой шанс. Спешите узнавать и применять знания для создания новых знаний.

Сотрудникам кафедры.

Во все времена наша кафедра была лидером и есть лидер. Делайте все возможное, чтобы слава про наш коллектив не меркла, а становилась громче и ярче, чтобы наши учителя — и здравствующие, и ушедшие — гордились нами.

Бесценным приобретением за годы учебы и работы на кафедре являются друзья — и среди учителей, и среди сокурсников, и среди тех, кто учился позже. Здоровья вам и новых надежных друзей!

Александр Михайлович ЗАЙЦЕВ

(профессор, физический факультет, Городской университет, Нью-Йорк, США).



1. Сохранился в памяти дух восторженного отношения к науке и знаниям, которые приобретал просто ненасытно. Вспоминаю Вячеслава Фомича Стельмаха, этого неутомимого ученого и педагога, в лаборатории которого работал. Он полностью доверял нам, молодым, и предоставлял возможность свободного творчества, но в то же время мы чувствовали огромную ответственность за конечный результат.

2. Да все знания пригодились! И когда учился в аспирантуре у Виктора Сергеевича Вавилова, и сейчас, когда читаю лекции американским студентам. На тот момент образование, приобретенное студентами-физиками в БГУ, имело всегда высокую оценку у ученых из МИФИ и МФТИ.

3. Тем, кто учится, хочется сказать следующее – чем больше возьмете знаний и опыта как студенты, магистранты или аспиранты, тем большего вы достигнете в любой области деятельности. Собственная работа в получении знаний может дать больше, чем просто лекции профессоров, но и лекции необходимы! Вспоминаю, как, будучи студентом, бегал с единомышленниками на факультет прикладной математики, чтобы там слушать лекции по математике, которые не читались на физическом факультете. Дух просто захватывало от количества выбранных новых для нас лекций! И это не в ущерб занятиям на физфаке.

Тем, кто учит, желаю набраться терпения и дать, по возможности, максимум знаний, научиться объяснять сложные вопросы, не пытаясь подготовить из 100 слушателей хотя бы одного А. Эйнштейна и этому одному дать высокий уровень предмета. Надо стараться из этих 100 слушателей подготовить как минимум 80 образованных людей, читая доступно обыкновенному студенту даже сверхсложный предмет. И при этом надо помнить об обратной связи.

Всем, кто учится, учит и передает опыт научных знаний, желаю здоровья и вдохновения!



Геннадий Владимирович ПАЛЬЧИК

(председатель Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь, член-корреспондент Международной академии наук педагогического образования, доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук).

1. Со студенческой скамьи очень яркие впечатления связаны с работой научно-проблемного семинара, который регулярно проводился на базе кафедры с участием ведущих ученых в сфере физики полупроводников и микроэлектроники, преподавателей и научных сотрудников кафедры, аспирантов и студентов, а также представителей электронной промышленности. Традиционно рассматривались результаты научных исследований, очень интересно и познавательно проводилась научная дискуссия, в частности, на предварительной экспертизе диссертационных работ.

2. Умение работать в команде, уважительное отношение друг к другу, достаточная принципиальность и корректность при обсуждении проблемных вопросов.

3. Сохранять лучшие традиции кафедры, развивать новые перспективные научные направления. Естественным и логичным завершением научных исследований должна стать успешная защита диссертаций. Здоровья, творческого вдохновения и благополучия всем поколениям нашей кафедры!

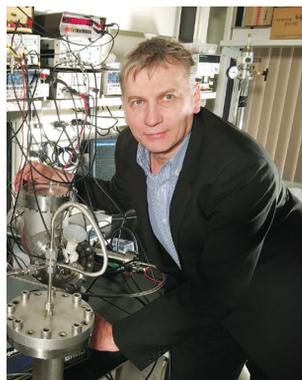
Владимир Александрович САМУЙЛОВ

(доктор наук, Университет Стоуни-Брук, США, Бостон).

1. Ткачёвские семинары в большой физической аудитории. Мне удалось застать их уже на излете, но все равно от них веяло старой школой «золотого» века современной науки. Это было прекрасное время! Ну и, конечно же, самоотверженная работа первого моего наставника на кафедре — Николая Александровича Поклонского, во многом повлиявшая на мое отношение к науке. Это был своего рода подвиг: все свое время посвятить науке и воспитанию молодого поколения ученых в нашей стране.

2. Лекции по специальности были очень важны и создавали необходимый базис для последующей работы и исследований. Вспоминаю лекции В. П. Доброго — по зонной теории, В. Ф. Стельмаха — по полупроводниковым приборам, А. А. Патрина — по неравновесным процессам.

3. Смело браться за любую задачу и идти к ее решению, не боясь преград и невзгод.





А. В. Юхневич (*справа*)
и В. Е. Гусаков (*слева*)

Анатолий Викторович ЮХНЕВИЧ

(ведущий научный сотрудник НИИ физико-химических проблем БГУ, кандидат физико-математических наук).

1. Одно из ярких впечатлений – защита собственной диссертации на тему «Исследование радиационных дефектов в монокристаллах кремния методом анализа спектров рекомбинационного излучения».
2. Все знания и опыт, приобретенные в период работы на кафедре, имели и имеют большое значение во всей моей жизни и работе.
3. Нынешним и будущим студентам, магистрантам и сотрудникам кафедры я желаю здоровья и поддержания на высоком уровне активного интереса к тому делу, которым занимаешься.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (В. Б. Огжаев)	3
Валентин Дмитриевич Ткачёв – ученый и учитель (В. Ю. Явуг).....	5
ШКОЛА ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ БГУ	19
Полупроводники в мире материалов и приборных структур (Н. А. Поклонский)	21
Электрические, гальваномангнитные, фото-термо-пьезоэлектрические и оптические свойства полупроводников (М. Г. Лукашевич, В. С. Просолович).....	30
Создание новых методик исследования полупроводников (А. В. Юхневич).....	36
Радиационные дефекты в арсениде галлия (В. М. Ломако).....	42
Электрофизика радиационных дефектов в кремнии (П. Ф. Лугаков).....	45
Радиационные дефекты в кремнии (П. В. Кучинский).....	52
Электрические свойства поликремния (А. К. Феготов).....	58
Дефектно-примесная инженерия в кремнии (А. Р. Челягинский)	64
Время жизни неравновесных носителей заряда в кремнии (М. И. Тарасик).....	71
Диэлектрическая проницаемость в облученных полупроводниках (П. В. Жуковский)	72
Редкоземельные и изовалентные примеси в кремнии (В. С. Просолович).....	74
Ионно-радиационная имплантация полимеров (В. Н. Попок)	80
Методы измерения параметров полупроводников. Приборы и техника эксперимента (Н. М. Казючиц).....	82
Радиоспектроскопия: от разработки приборов до научных исследований (Н. М. Лапчук)	95
Низкоразмерные системы в нанoeлектронике, фотонике и спинтронике (В. К. Ксеневиц, В. А. Доросинец).....	105
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	117
Достижения прошлого – залог успешного будущего (С. В. Агашкевич, Н. М. Лапчук, Т. М. Лапчук, А. Н. Олешкевич).....	119
Современное состояние научной школы физики полупроводников (И. И. Азарко)	124
Подготовка специалистов на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники (Н. М. Лапчук, Н. И. Горбачук, Т. М. Лапчук)	134
ИНТЕРВЬЮ С ВЫПУСКНИКАМИ КАФЕДРЫ	157

Научно-популярное издание

**ШКОЛА ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ БГУ**

**Кафедре физики полупроводников
и нанoeлектроники 50 лет**

Редактор *Н. Ф. Акулич*

Художник обложки *Т. Ю. Таран*

Художественный редактор *Т. Ю. Таран*

Технический редактор *Т. К. Раманович*

Компьютерная верстка *Ю. Г. Вержбицкой, И. К. Ржеуцкой*

Корректоры *М. А. Харчевник, Н. В. Яненко*

Подписано в печать 22.09.2016. Формат 60×84/16. Бумага мелованная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 10,96.

Тираж 100 экз. Заказ 536.

Белорусский государственный университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/270 от 03.04.2014.

Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.

Республиканское унитарное предприятие

«Издательский центр Белорусского государственного университета».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.

Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.