РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Томск — 1981

физических наук...

1981

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В. В. КУЙБЫШЕВА

К 100-летию со дня основания
(1880—1980)

РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

1-425614

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Томск — 1981

Развитие физических наук в Томском университете: Сборник статей. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. — 8,5 л. — 1 р. 30 коп. 500 экз. 20301.

В сборнике представлены статьи, отражающие развитие основных научных направлений по физическим наукам в Томском университете. Кратко излагаются наиболее важные научные достижения по физике твердого тела, физике полупроводников и диэлектриков, радиоэлектронике, электромагнетизму и электромагнитным методам контроля, радиофизике, оптике и спектроскопии.

Сборник представляет интерес для студентов старших курсов и аспирантов по физическим специальностям, сотрудников научно-исследовательских институтов и инженеров промышленных предприятий.

5 нб

Редакторы — В. И. Гаман, М. А. Кривов

20301
177(012) — без объявл.

© Издательство Томского университета, 1981 г.

НБД

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начало развития физики в Томском университете относится к 1888 году и связано с именем известного ученого, первого ректора университета, профессора Н. А. Гезехуса, который впоследствии возглавлял русское физико-химическое общество и был редактором его журналов. Неоценимы заслуги Н. А. Гезехуса в постановке курса физики в университете и в организации лекционных демонстраций по этому курсу. Интенсивные исследования атмосферного электричества проводил в период своей работы в Томском университете (1888—1909 гг.) профессор Ф. Я. Капустин. Вслед за Ф. Я. Капустиным курс физики читал профессор Б. П. Вейнберг, а затем профессор А. П. Поспелов, больше известный своими трудами в области электрохимии. Систематические исследования по физике, послужившие отправной точкой для большинства научных направлений сегодняшнего дня, начаты в университете в 20-х годах нашего столетия. После открытия в 1928 году Сибирского физико-технического института при университете особенно интенсивно велись исследования по физике твердого тела, радиоэлектронике, электромагнетизму и электромагнитным методам контроля, радиофизике, физике диэлектриков, оптике и спектроскопии. В 50-е годы появилось еще два научных направления: физика полупроводников и кибернетика.

Главой томской школы по физике твердого тела в течение длительного времени был чл.-кор., а затем действительный член АН СССР В. Д. Кузнецов. Заметный вклад в развитие этого раздела физики внесли профессора М. А. Большанина, К. В. Савицкий, доктора наук В. Н. Кащеев и Г. Д. Полосаткин. В конце 50-х годов по инициативе профессора В. Е. Панина были поставлены исследования по теории сплавов, которые развиваются и в настоящее время. Интересные результаты в этой области получены профессорами В. П. Фадиным, А. Д. Коротаевым, Н. С. Голосовым, Л. Е. Поповым, доктором наук В. Ф. Суховаровым и другими сотрудниками.

Начало работ по радиоэлектронике связано с именем профессора А. Б. Сапожникова, научные интересы которого

в дальнейшем сконцентрировались в основном на магнитной дефектоскопии. Большой цикл работ по радиоэлектронике выполнен под руководством профессоров В. Н. Детинко, А. С. Петрова и доцента Э. С. Воробейчикова. Работы по электромагнитным методам контроля в настоящее время ведутся под руководством доктора наук В. С. Семенова.

Основателем исследований по радиофизике в университете был профессор В. Н. Кессених. Его ученики успешно развивают это направление работ в наши дни. Заведующий кафедрой радиофизики профессор М. С. Бобровников возглавляет исследования по дифракции электромагнитных волн и электродинамике излучающих систем. Под руководством доктора наук А. И. Лихачева и замдиректора СФТИ В. А. Филоненко выполнен большой объем работ по исследованию ионосферы и распространению радиоволн.

Наиболее значительные работы по физике диэлектриков были выполнены под руководством первого заведующего кафедрой электрофизики (переименованной впоследствии в кафедру физики полупроводников и диэлектриков) профессора К. А. Водопьянова и доцента А. М. Вендеровича. Появление и развитие физики полупроводников в Томске связано с работами, выполненными под руководством профессора В. А. Преснова, доцента М. А. Кривова, старших научных сотрудников, кандидатов наук А. П. Вяткина и П. Е. Рамазанова, доцента Л. Г. Лаврентьевой. Заведующий кафедрой физики полупроводников и диэлектриков, профессор В. И. Гаман возглавляет работы по исследованию стеклообразных полупроводников и тонкопленочных структур на их основе.

Фундаментальные результаты в области физики твердого тела, физики полупроводников и квантовой электродинамики получены теоретиками университета под руководством старших научных сотрудников, кандидатов физико-математических наук В. А. Чалдышева, Г. Ф. Караваева и профессора В. Г. Багрова.

Первые работы по кибернетике были выполнены студентами и аспирантами радиофизического факультета под руководством профессора В. Н. Кессениха и доцента П. П. Бирюлина. Впоследствии из этого коллектива выросла целая плеяда профессоров (А. Д. Закревский, ныне чл.-кор. АН БССР, Г. А. Медведев, В. П. Тарасенко, Ф. П. Тарасенко, А. Ф. Терпугов), труды которых широко известны у нас в стране и за рубежом.

Организаторами и руководителями работ по исследованию взаимодействия света с веществом и по спектроскопии были профессора П. С. Тартаковский, В. М. Кудрявцева, Н. А. Прилежаева, Ф. И. Вергунас. В настоящее время работами в области молекулярной спектроскопии и квантовой химии руководит доктор наук В. И. Данилова, а по спектро-

скопии газоразрядной плазмы — доцент В. С. Мельченко. Томск является одним из немногих центров, где проводятся исследования по оптике атмосферы, которые были начаты по инициативе заведующего лабораторией инфракрасных излучений В. Е. Зуева, ныне чл.-кор. АН СССР, директора Института оптики атмосферы СО АН СССР, заведующего кафедрой оптико-электронных приборов.

Большое внимание уделяли развитию перечисленных выше научных направлений директора СФТИ академик В. Д. Кузнецов и доцент М. А. Кривов.

Как и во всяком вузе, в Томском университете большой вклад в научные исследования внесла талантливая молодежь из числа студентов старших курсов и аспирантов.

В обзорных статьях данного сборника кратко излагаются наиболее важные результаты научных исследований, полученные коллективами СФТИ, физического и радиофизического факультетов. В связи с организацией академических институтов и перенесением в них центра исследований по оптике атмосферы и квантовой электродинамике в данном сборнике первое направление работ отражено не в полной мере, а второе — вообще не рассматривается. Представление о современном уровне работ по этим вопросам можно получить, ознакомившись с тематическими выпусками журнала «Известия вузов. Физика», № 11, 1977, № 2, 1980; По ряду причин в сборнике не отражены результаты научных исследований в области кибернетики.

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В. Е. ПАНИН, А. Д. КОРОТАЕВ

Начало широкого развития исследований по физике твердого тела в Томском университете и формирования томской школы физиков по этому научному направлению положили первые работы В. Д. Кузнецова, появившиеся в 1924 г. Не будет преувеличением сказать, что среди всех проблем физики твердого тела наименее изученными в то время оставались вопросы, связанные с конструкционной прочностью кристаллических материалов. Отсутствие физических моделей и сколько-нибудь обоснованных микроскопических представлений о процессах и явлениях, протекающих при пластическом формоизменении и разрушении металлов и сплавов, определяло чисто феноменологический подход к описанию поведения материалов при механическом воздействии.

В. Д. Кузнецов был одним из первых ученых-физиков, кто осознал, что решение проблемы создания новых материалов с заданными свойствами невозможно в рамках классического металловедения и требует привлечения современных методов, экспериментальной техники и представлений физики твердого тела. По-видимому, именно с этим научным направлением В. Д. Кузнецов, всегда заботившийся о практической значимости научных исследований, связывал наиболее широкие возможности использования найденных закономерностей в промышленности. Неудивительно, что среди научных направлений, развиваемых В. Д. Кузнецовым, наряду с чисто научными проблемами, связанными с изучением поверхностной энергии твердых тел, кристаллизацией и др., очень большое место занимали вопросы трения и износа металлов, резания металлов, а в годы Великой Отечественной войны — вопросы бронепробиваемости. В этих, казалось бы, чисто технических вопросах В. Д. Кузнецов находит принципиальные физические задачи, решение которых ярко демонстрирует плодотворность и эффективность использования физических идей и методов в технике. Основные исследования В. Д. Кузнецова [1—9] можно разбить по следующим научным направлениям: 1) поверхностная энергия твер-

дых тел; 2) кристаллизация и рекристаллизация; 3) пластичность и прочность; 4) трение и износ металлов; 5) резание металлов.

Оригинальные и интересные идеи В. Д. Кузнецова [7—8] о роли поверхностной энергии твердых тел в различных физических явлениях и процессах, происходящих при пластической деформации и разрушении, имели важнейшее значение для понимания абразивного износа хрупких веществ и, в частности, позволили связать параметры шлифования таких материалов с их поверхностной энергией. Большую известность получили работы В. Д. Кузнецова, посвященные анализу физической значимости такой важной в техническом отношении характеристики, как твердость. При трактовке этого понятия В. Д. Кузнецов показал, что для хрупких веществ твердость может характеризоваться поверхностной энергией кристаллов.

Работы В. Д. Кузнецова по экспериментальной проверке отношения поверхностных энергий различных граней ионных кристаллов, измерению абсолютных значений поверхностной энергии методом скола, разработке новых методов измерения отношений поверхностных энергий и выяснению границ применимости разных методов могут считаться классическими и до сих пор неизменно цитируются в отечественной и зарубежной литературе.

Большой цикл работ выполнен В. Д. Кузнецовым со своими учениками по исследованию явлений кристаллизации и рекристаллизации. Эти работы посвящены выяснению условий образования столбчатых кристаллов и мер по их исключению, установлению аналитической зависимости скорости роста границ кристалла от градиента температуры, скрытой теплоты плавления и коэффициента теплопроводности. В ряде работ изучены влияние примесей на число центров кристаллизации, скорость их роста и внешнюю огранку кристаллов. В области рекристаллизации в исследованиях было обращено внимание на роль двойников и границ между двойникованным и недвойникованным кристаллами, на механизм образования центров рекристаллизации и их дальнейшего роста.

Важное значение в развитии работ по кристаллизации в нашей стране и, в частности, в решении проблемы искусственного выращивания кристаллов имели посвященные вопросам кристаллизации обзор В. Д. Кузнецова в монографии «Физика твердого тела» и монография «Кристаллы и кристаллизация».

Исследования В. Д. Кузнецова по проблеме пластичности и прочности твердых тел позволили установить важные закономерности на ионных кристаллах и были широко продолжены им и его учениками на металлических кристаллах.

Из этого цикла работ значительный интерес представляли исследования по внутреннему трению в твердых телах, влиянию скорости деформирования на механические свойства металлов. К этому же циклу работ следует отнести изучение хрупкости стали при низких температурах. Изучая совместно с А. Н. Добровидовым вопрос о хрупкости рельсовых сталей, В. Д. Кузнецов установил, что для смещения критической области хрупкости в сторону низких температур необходимо производить термическую обработку стали на сорбит. В военные годы В. Д. Кузнецов осуществил серию работ по исследованию процесса бронепробиваемости, при этом ему, в частности, удалось установить зависимость бронестойкости от механических свойств материала. Результаты этих работ В. Д. Кузнецов обобщил в своей книге «Физика бронепробиваемости».

Дальнейшее развитие работ по физике пластичности и прочности связано с именем ученицы В. Д. Кузнецова проф. М. А. Большаниной. Исключительно плодотворными оказались идеи В. Д. Кузнецова по проблеме резания металлов. Результаты исследований по стружкообразованию, влиянию различных факторов на изменение констант резания и усадку стружки, отысканию связи между резанием и пластическим сжатием металлов по существу сформировали оригинальный физический подход к вопросам резания, который в дальнейшем получил всеобщее признание как «томское направление» в проблеме резания металлов.

Исключительно интересной и перспективной оказалась впервые высказанная В. Д. Кузнецовым идея о сверхскоростном резании металлов [3]. Теория этого процесса была изложена им в обширном докладе, прочитанном на одном из заседаний Всесоюзной комиссии по резанию. Первые опыты, проведенные по сверхскоростному резанию, позволили В. Д. Кузнецову сделать вывод о возможности обработки металлов резанием при отрицательных углах резания (метод «термофрезера»). В дальнейшем скоростное резание металлов с отрицательным передним углом нашло широкое применение в производстве.

В. Д. Кузнецов изобрел способ исследования процессов резания при сверхвысоких скоростях, заключающийся в том, что цилиндрической заготовке сообщают движение относительно режущего инструмента, помещенного у дульного среза артиллерийской системы, движением пороховых газов в стволе указанной системы (авторское свидетельство № 105967, опубликовано в 1957 г.). Исследованиями В. Д. Кузнецова учение о резании металлов было поднято до уровня глубокой физической науки. Оно получило всеобщее признание и явилось основанием для постановки многочисленных исследований по резанию металлов со скоростя-

ми 100—800 м/с. В частности, Г. Д. Полосаткиным, одним из учеников В. Д. Кузнецова, сверхскоростное резание металлов используется как метод для построения динамических кривых «напряжение — деформация» при скоростях деформации более 100 м/с. Исследования по сверхскоростному резанию и шлифованию продолжаются учениками В. Д. Кузнецова. В последнее время успешно прошли производственные испытания разработанные в СФТИ методы высокоскоростного шлифования с использованием специально сконструированного высокоскоростного шлифовального круга, дающего возможность увеличить скорость шлифования до 80—100 м/с. При увеличении скорости шлифования в производственных условиях до 80 м/с съем металла увеличивался на 20%, износ шлифовальных кругов уменьшался на 25%, чистота поверхности увеличивалась на один класс.

Большой цикл работ выполнен под руководством В. Д. Кузнецова по чрезвычайно технически важной проблеме трения и износа. Эта проблема была и остается исключительно актуальной, а задача выяснения общих закономерностей трения и износа, как и создания новых износостойких антифрикционных материалов, имеет большое народнохозяйственное значение. Достаточно сказать, что срок службы огромного числа дорогостоящих машин и механизмов существенно ограничен износом деталей, работающих в условиях трения.

Между тем часто исследования по износостойкости материалов в зависимости от условий трения и состояния трущихся тел имеют своей целью решение узкопрактических частных задач применительно к ограниченному кругу материалов и условий работы тех или иных деталей и механизмов. Разнообразие методов исследования без достаточного учета особенностей каждого из них затрудняло сопоставление и обобщение результатов различных исследований. В этой связи исключительно важным представлялось выяснение достаточно общих физических процессов, происходящих при взаимном скольжении металла по металлу и металла по неметаллической шероховатой поверхности, со смазкой и без смазки.

В работе В. Д. Кузнецова и его учеников (проф. К. В. Савицкий, В. Н. Кащеев, Г. Д. Полосаткин и др.) физически весьма сложный процесс трения был подвергнут всестороннему изучению. Исследовались пластические деформации в зоне трения, контактирование твердых тел в процессе их взаимного скольжения, температурные режимы трения, влияние температурных градиентов. Изучались диффузионные явления в контакте трения, специфические фазовые переходы, связанные с температурами и деформациями в контактирующих слоях. Подчеркнута колоссальная роль

адгезии и холодного схватывания при так называемом «металлическом трении».

В. Д. Кузнецову принадлежит весьма важная и плодотворная идея о возникновении микронаростов при трении [8]. Эти идеи широко использовались для объяснения явлений при внешнем трении и износе. В частности, с учетом возникновения микронаростов удалось объяснить зависимость коэффициента трения от скорости.

Критическому анализу и обобщению собственных исследований, а также данных отечественной и зарубежной литературы посвящена монография В. Д. Кузнецова «Наросты при резании и трении».

Об оригинальности рассмотренных в ней вопросов, важности и высокой значимости полученных результатов свидетельствует тот факт, что эта книга переведена на английский язык и издана в 1964 г. международным издательством (Оксфорд—Лондон—Эдинбург—Париж—Нью-Йорк).

Существенный вклад в развитие этого направления был сделан учениками В. Д. Кузнецова проф. К. В. Савицким и проф. В. Н. Кащеевым. В работах К. В. Савицкого была установлена связь между механическими свойствами поверхностных слоев трудящихся тел и процессами упрочнения и отдыха материала. Было показано, что одним из наиболее важных факторов повышения износостойкости является повышение температурной устойчивости механических свойств изнашиваемых металлов. В этой связи важное значение имели полученные К. В. Савицким результаты, свидетельствующие об определяющем влиянии в изменении механических свойств на поверхностях трения средней температуры слоя вблизи контактной поверхности, а не локальных разогревов в местах реальных контактов.

Важное значение в исследовании износостойкости, как показано в работах К. В. Савицкого и его учеников, имеет учет диффузионных явлений, изменений фазового состава и фазовых превращений на поверхностях трения, вследствие значительного нагрева поверхностных слоев. Явления изменения фазового состава, связанные с обезуглероживанием поверхностных слоев, были изучены на примере малолегированных сталей.

Под руководством К. В. Савицкого были разработаны новые стали повышенной износостойкости и прочности для работы в условиях Сибири и Крайнего Севера. В дальнейшем созданные на основе этих разработок одним из учеников К. В. Савицкого, Ю. Д. Новомейским износостойкие и хладостойкие стали были запатентованы в США, Швеции, ФРГ, Канаде, нашли широкое применение на ряде машиностроительных предприятий в нашей стране.

Под руководством В. Д. Кузнецова был выполнен ряд работ, посвященных изучению наиболее разрушительного вида износа — абразивного. Были вскрыты основные закономерности абразивного износа, феноменологические аспекты его механизма, факторы, лежащие в основе сопротивления абразивному разрушению. Глубокому изучению подвергались сами промышленные абразивные материалы, такие, как электрокорунд и карбид кремния. Стало возможным не только оценивать их абразивную способность, но и изменять ее в значительных пределах.

Результаты этих исследований были обобщены в докторских диссертациях К. В. Савицкого и В. Н. Кащеева, монографиях В. Н. Кащеева «Абразивное разрушение твердых тел» и «Процессы в зоне фрикционного контакта металлов».

Параллельно с исследованиями трения, износа и резания металлов в СФТИ большим коллективом металлофизиков под руководством проф. М. А. Большаниной интенсивно развивались исследования по проблемам физики пластичности и прочности. В годы становления этого направления физики твердого тела весьма плодотворной оказалась предложенная М. А. Большаниной идея, согласно которой пластическая деформация металлов определяется совокупностью атермического процесса упрочнения и термически активируемого процесса отдыха [11—12].

Предполагалось, что процесс упрочнения, сопровождающийся изменением физических свойств твердого тела, снижением пластичности, увеличением внутренней энергии решетки и т. д., должен определяться лишь одним параметром — степенью деформации — и в чистом виде выступает только при очень низких температурах. В этих условиях возникающие в процессе пластического формоизменения искажения решетки полностью сохраняются и, следовательно, накапливаются по мере деформирования.

Процессы отдыха предполагались связанными с «обменом атомов местами в искаженных участках кристаллической решетки, приводящего к уничтожению этих искажений». Единственный энергетический источник, за счет которого могут происходить атомные перераспределения,— энергия теплового движения атомов. Таким образом, процессы отдыха предполагались связанными со снятием различного сорта возникающих при деформации искажений решетки в результате термически-активируемого движения атомов по узлам решетки. Следовательно, процессы отдыха должны протекать не только после, но и в процессе деформирования и определять температурно-временную зависимость механических свойств. На основе высказанных соображений проф. М. А. Большаниной было получено аналитическое выражение

для кривых течения. При этом представлялось возможным провести целенаправленное экспериментальное изучение входящих в полученное уравнение параметров [2, 11, 12].

В результате развития теории и экспериментальных исследований по выяснению механизма процессов отдыха удалось вскрыть общие закономерности температурно-скоростной зависимости сопротивления деформированию металлов, зависимости упрочнения от температуры плавления металлов, предсказаны качественные закономерности термической стабильности высокопрочного состояния металлов, деформированных в различных условиях.

По-видимому, развитые проф. М. А. Большаниной и ее учениками (Л. И. Васильев, М. Б. Макогон, Г. И. Карпов, А. Г. Донец, Ю. А. Студенок и др.) представления могут рассматриваться как законченное феноменологическое описание физической картины явления деформационного упрочнения металлов.

Значительную роль в развитии физических представлений о природе возникающих при деформации искажений решетки имели выполненные под руководством проф. М. А. Большаниной исследования по скрытой энергии деформации [2, 10]. Коллектив СФТИ, по существу, являлся единственным у нас в стране научным цетром, где проводились широкие целенаправленные исследования закономерностей повышения энергии при деформации с целью выяснения природы искажений решетки, остающихся в металлах после деформации.

М. А. Большаниной и ее учениками был разработан достаточно эффективный метод измерения скрытой энергии деформации, с применением которого для большого числа чистых металлов были измерены абсолютные значения скрытой энергии деформации, ее зависимости от степени, вида и скорости деформации, температуры испытания, изучалось влияние состава сплавов — твердых растворов на закономерности поглощения энергии при деформации. Все это позволило получить количественные энергетические характеристики неравновесного состояния металлов и сплавов после деформации.

В дальнейшем эти результаты были проанализированы на основе пердставлений о линейных и точечных дефектах кристаллического строения в работах М. А. Большаниной и В. Е. Панина и была показана их научная значимость в развитии микроскопической теории пластического течения в металлах и сплавах [10].

Естественным развитием работ руководимого проф. М. А. Большаниной научного направления является большой цикл исследований по влиянию атомных перераспределений в сплавах на их механические и физические свойства [13, 16, 18, 25, 27, 44]. Процессы атомного упорядочения, образова-

ние концентрационных неоднородностей и др. процессы, связанные с диффузионными фазовыми превращениями, а также выяснение связи указанных процессов с точечными дефектами и особенностями дислокационной структуры сплавов широко изучались в работах учеников проф. М. А. Большаниной, В. Е. Паниным, Л. Е. Поповым, М. Б. Макогоном, А. Д. Коротаевым, В. Ф. Суховаровым, Л. С. Бушневым и др. [26, 33, 34, 39, 46].

Ряд работ, выполненных под руководством М. А. Большаниной на конкретных технических сплавах, нашел практическое применение в промышленности. В этой связи необходимо отметить интересный цикл исследований (совместно с М. Б. Макогоном, Т. Ф. Елсуковой, П. А. Кондратьевым) по механизму влияния легирования на механические свойства, вибрационную стойкость и ползучесть сплавов на основе свинца, завершившийся созданием новых свинцовых сплавов для кабельных оболочек [14, 36, 37, 43]. Один из этих сплавов включен в ГОСТ, широко внедряется в кабельной промышленности. Работы по созданию новых свинцовых сплавов были удостоены золотой, серебряной и бронзовой медалями ВДНХ.

Организационно физика твердого тела, как и вся физика в Томском университете, концентрировалась в стенах Сибирского физико-технического института. Его директор, акад. В. Д. Кузнецов, был заведующим лабораторией резания и трения. Профессора М. А. Большанина и Савицкий К. В. одновременно возглавляли научные лаборатории СФТИ и кафедры на физическом факультете Томского госуниверситета. Имела место чрезвычайно благоприятная обстановка органического единства СФТИ и физических факультетов ТГУ, обеспечивающая высокий уровень подготовки молодых специалистов и интенсивное развитие в Томском университете современных направлений физики.

Высокие темпы научно-технического прогресса и необходимость разработки новых материалов обусловили развитие в СФТИ работ в области теории сплавов. Учениками проф. М. А. Большаниной (В. Е. Панин, Л. Е. Попов, В. П. Фадин, А. Д. Коротаев, М. Б. Макогон, В. Ф. Суховаров, Н. С. Голосов, Э. В. Козлов, Т. Ф. Елсукова) стало развиваться новое для СФТИ направление — электронная структура, атомное распределение и природа фаз в сплавах [20, 29, 30, 48, 49]. Учениками проф. К. В. Савицкого (Ю. И. Паскаль, В. А. Куликов, В. И. Итин, А. П. Савицкий) стали разрабатываться вопросы термодинамики сплавов, физики спекания, внутреннего окисления [40, 50—52]. Эти работы ставили своей задачей расчет электронных состояний в металлических кристаллах, построение теории фаз в сплавах и создание научных основ разработки новых материалов.

Была создана группа собственных теоретиков (М. Ф. Жоровков, В. Е. Егорушкин, Ю. А. Хон и др.), тематика которых тесно связывалась с работами экспериментаторов. Именно такой подход позволил обеспечить высокий уровень фундаментальных исследований в области физики металлических сплавов, нацеленных на решение важных прикладных задач.

Наряду с этим наметилось углубленное изучение природы пластичности, прочности и разрушения металлических материалов. В самостоятельное направление вылился раздел работ, связанный с явлениями неупругости и микродеформации (Л. А. Соловьев, Е. Ф. Дударев, Н. В. Никитина) [18, 40, 41, 47]. Современная электронная микроскопия позволила подвести серьезную базу под изучение механизмов деформационного упрочнения (Л. С. Бушнев, А. Д. Коротаев, В. Ф. Суховаров). Износ металлических материалов стал описываться на основе теоретической механики и теории дислокаций (Ю. И. Коган, В. Н. Кашеев) [17, 45]. Были начаты работы по анализу природы пластичности и прочности металлов, сплавов и соединений на основе электронных представлений (В. Е. Панин). Стали проводиться исследования механики высокоскоростного соударения (Г. Д. Полосаткин, Л. А. Кудрявцева).

Успехи в области фундаментальных исследований явились основой важных прикладных работ по созданию новых материалов: композиционных материалов различного назначения (В. Е. Панин, Л. М. Буткевич, В. А. Куликов, Е. Ф. Дударев, В. Е. Овчаренко и др.), спеченных металлов и сплавов (А. П. Савицкий), материалов с эффектами сверхэластичности и памяти формы (Л. А. Соловьев, В. Н. Хачин, В. И. Итин, Ю. И. Паскаль, А. И. Лотков и др.), пружинных сплавов (Л. М. Буткевич, Л. А. Соловьев, Е. Ф. Дударев, Н. В. Никитина, В. Ф. Суховаров).

Мощный научный потенциал и наличие современной материально-технической базы позволили проводить планирование крупных фундаментальных исследований, комплексирование тематики работы отдельных лабораторий и кафедр факультета, организовать широкий фронт внедрения научных разработок.

Перечислим наиболее важные научные результаты, полученные за последние десять лет.

I. Теория сплавов

1. Проведен цикл работ по развитию методов расчета энергетического спектра электронов и электронных характеристик в сплавах переходных элементов, что чрезвычайно важно для выяснения природы межатомного взаимодействия

компонентов в сплаве, их взаимной растворимости и образования фаз, структурных фазовых переходов, физических и механических свойств сплава [29, 32, 35, 48, 49]. Основное внимание уделено методам функций Грина, присоединенных плоских волн, функционала электронной плотности, псевдопотенциала и когерентного потенциала.

Удалось распространить метод функций Грина на разупорядоченные сплавы, что позволило ставить и решать задачи о состоянии электронов в сплавах при любом составе и произвольном характере распределения атомов. Принципиальное значение при этом имеет возможность сопоставления рассчитанных значений энергии кристалла для любых структурных состояний в рамках единого формализма используемого метода расчета.

Разработан интерполяционный метод расчета энергий электронного газа в произвольной точке зоны Бриллюэна, позволяющий получить достаточно быстро и просто полную картину электронно-энергетического спектра в сплавах переходных элементов.

Общей закономерностью спектров бинарных сплавов переходных элементов является разделение *d*-полосы на две группы, каждая из которых соответствует одному из компонентов и обусловливает значительную роль в фазовых равновесиях взаимодействия одноименных атомов в сплаве. Появление энергетической щели между двумя группами полос стабилизирует образование сверхструктуры или интерметаллида. Зонная структура (положение уровня Ферми относительно щелей, структура последних, величина плотности электронных состояний на уровне Ферми) определяет устойчивость кристаллической структуры сплава и возможность структурных фазовых переходов.

2. Сформулированы физические принципы и разработаны методы расчета фазовых диаграмм состояния металлических сплавов на основе квантовой теории твердого тела.

Квантово-механический расчет термодинамического потенциала сплава с самосогласованным учетом всех возмущений, которые вызывают атомы легирующего элемента в кристалле металла-растворителя, позволяет построить фазовые диаграммы сплавов из первых принципов (только на основе электронных характеристик чистых компонентов) и вскрыть природу образования и устойчивости фаз в сплавах. Получен ряд принципиально новых результатов по устойчивости фаз в сплавах при любом заданном давлении, которые не может предсказать классическая термодинамика: существование соединений компонентов, которые не смешиваются друг с другом в разупорядоченном состоянии, определяющая роль в стабильности интерметаллических соединений с высокими куполами плавления не разноимен-

ного взаимодействия, а межатомного взаимодействия в подрешетке одного из компонентов, возникновение вакансий легирования около атомов малорастворимых примесей и их роль в фазовых равновесиях и процессах распада и др.

3. Получила дальнейшее развитие статистическая теория атомного упорядочения и образования фаз в сплавах. Учтены в теории такие важные факторы, как корреляция в расположении атомов, взаимодействие спинов, изменение энергии межатомного взаимодействия при образовании фаз в сплавах [19, 22, 28, 31].

На основе усовершенствованного метода вариации кластеров Кикучи учтены многочастичные корреляции в статистической теории упорядочения и показана их важная роль в фазовых равновесиях. Развитый подход позволил качественно правильно рассчитать фазовые диаграммы порядок-беспорядок для ряда классов сплавов с различными сверхструктурами.

Предложена модель, которая учитывает изменение энергии взаимодействия атомов при образовании фаз. Эта модель позволяет изучать фазовые превращения с изменением типа решетки. Показано существование связи между параметрами межатомного взаимодействия в фазах, их структурным состоянием и видом фазовых диаграмм. Для каждой конкретной системы параметры взаимодействия могут быть найдены путем согласования рассчитанных и экспериментально построенных диаграмм.

Изучен вопрос о роли магнетизма в стабильности сверхструктур и интерметаллических соединений. Показано, что магнетизм дает вклад в стабильность соединений и влияет на их кристаллическую структуру. Развита статистическая теория данного влияния.

4. Разработана теория структурной неустойчивости в интерметаллических соединениях со структурой B2, которые составляют наиболее крупный класс сплавов с термоупругими мартенситными превращениями. Показано, что в основе структурной неустойчивости и термоупругих мартенситных превращений в данных сплавах лежит наличие щелей в их электронно-энергетическом спектре. Легирование соединения третьим элементом влияет на зонную структуру (положение уровня Ферми относительно щелей, структуру последних, величину плотности электронных состояний на уровне Ферми) и тем самым существенно изменяет характер и температурные области протекания мартенситных превращений.

Систематически изучена кристаллография фазовых переходов в сплавах на основе TiNi. Показано, что в зависимости от состава сплава в нем могут осуществляться различные последовательности переходов. Проведена их классификация. Предложена феноменологическая схема описания различных

ситуаций термоупругих мартенситных превращений в исследованных сплавах [40, 50—52].

5. Выполнен цикл исследований по выяснению ряда фундаментальных проблем формирования гетерофазных структур металлических сплавов и разработки методов целенаправленного управления структурой [33, 39, 46].

Исследованы условия и кинетика формирования квазипериодических структур при различных механизмах распада металлических сплавов, изучено влияние на указанные процессы условий зарождения новой фазы, ее объемной доли, атомного несоответствия с матрицей и других параметров выделяющейся фазы.

Выдвинута и всесторонне изучена проблема механико-термической обработки сплавов, стареющих по механизму прерывистого выделения фаз. Выяснены закономерности изменения морфологии и характера структурного сопряжения частиц новой фазы и матрицы в зависимости от кинетических особенностей ячеистого распада. Предложено и получило экспериментальное обоснование положение о том, что прерывистый распад в термодинамике фазовых превращений имеет не менее общее значение, нежели непрерывный распад с гетерогенным зарождением новой фазы. Найдены необходимые условия прерывистого распада и факторы, определяющие соотношение между прерывистым и непрерывным распадом в сплавах с модулированной структурой.

1437614

Предложен метод целенаправленного управления степенью ячеистого распада путем растворения при возврате непрерывно выделившейся фазы и закрепления высокоугловых границ карбидными фазами. Показана принципиальная возможность стабилизации квазипериодических структур с использованием процессов типа окисления и карбидизации.

Предложена и экспериментально доказана возможность получения дисперсно-упроченных материалов на основе тугоплавких сплавов ниобия и молибдена с заданным распределением неметаллической фазы путем ее формирования в условиях высокой плотности дефектов кристаллического строения, а также методом стабилизации исходной фазы.

В рамках механики сплошных сред выведены строгие, уточненные соотношения между межфазным потоком вещества и потоками вещества в фазах; на этой основе, в частности, уточнена рабочая формула для определения коэффициента диффузии в расплавах методом вращающегося диска.

Составлен и обоснован вариационный принцип неравновесной термодинамики в формулировке, которая в отличие от известных, охватывает системы с подвижной межфазной границей. Показано, что, основываясь на этом принципе, можно развить вариационный метод решения задач о диффузионном росте новой фазы (с применением непосредствен-

ЧНАЯ БИБЛ

ных процедур отыскания экстремума функционала на ЭВМ). Осуществлено машинное моделирование процесса фазового расслоения в бинарном твердом растворе с ближайшим взаимодействием. Установлены критерии двухфазности в терминах функции распределения кластеров по размерам и парной корреляционной функции, а также постепенное изменение кинетики процесса в модельной системе с понижением температуры и обнаружены качественные признаки спинодального распада при низких температурах. Решена задача о нахождении равновесной функции распределения кластеров по размерам и по конфигурациям в разбавленном бинарном твердом растворе.

II. Научные основы создания новых материалов

1. Показано, что в смесях разнородных металлических порошков, образующих при взаимодействии интерметаллиды с большой теплотой образования, возбуждаются и протекают процессы теплового взрыва или послойного горения. При этом наблюдается самораспространяющийся высокотемпературный синтез интерметаллидов.

Установлены кинетические закономерности и механизм процессов, протекающих при синтезе. Показано, что они определяются реакционной диффузией и растворением, развивающимися на поверхности раздела в присутствии жидкой фазы. При этом процесс растворения твердого металла в жидком в системах с интерметаллидами на диаграмме состояния сопровождается значительным саморазогревом, локализованным вблизи межфазной поверхности. В результате он способен поддерживать самораспространяющийся высокотемпературный синтез и обеспечивать высокую степень превращения.

Для выяснения закономерностей взаимодействия металлов и интерметаллидов с расплавами и образования новых фаз на поверхностях раздела изучена кинетика растворения и реакционной диффузии в системах с интерметаллидами. Дано полное кинетическое описание взаимодействия твердых переходных металлов с расплавами алюминия и олова.

Установлена связь между диаграммой состояния системы и параметрами горения. Определены условия, при которых максимальная температура горения или теплового взрыва равна температуре ликвидуса.

Исследованы процессы усадки и роста при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе и реакционном спекании. Показано, что объемный рост прессовок в значительной степени связан с диффузией легкоплавкого компонента в частицы тугоплавкого и образованием на поверхно-

сти раздела интерметаллидов с иным удельным объемом, чем у матрицы, в условиях, когда прессовка находится в твердо-жидком состоянии. Направление диффузионного потока при этом определяется парциальными коэффициентами диффузии компонентов в интерметаллических соединениях.

Разработаны оригинальные способы получения интерметаллических соединений и сплавов на их основе, в том числе в виде порошков, в режимах послойного горения или теплового взрыва.

При этом синтезированы: а) алюминиды, силициды и сложные бориды металлов IV—VIII групп периодической системы элементов (основа жаропрочных материалов, жаростойких тугоплавких покрытий, катализаторов, магнитных сплавов, режущего инструмента); б) лигатурные сплавы на основе алюминидов и силицидов для легирования спецсплавов и сталей; в) сплавы на основе никелида титана и алюминидов меди (металлы с эффектом памяти формы); г) пиротехнические безгазовые составы и материалы для специальных целей.

Разработана технология получения полуфабрикатов различных сплавов, основанная на использовании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Технология и материалы, полученные с ее помощью, защищены авторскими свидетельствами.

2. Разработаны физические основы термической стабильности композиционных материалов, связанные с предотвращением растворимости армирующих волокон в матрице, образования на межфазных границах интерметаллидов и активированной рекристаллизации волокон [21, 23, 42].

Показана четкая корреляция растворимости армирующих волокон (металлы VI группы, углеродные волокна) в никелевых сплавах с плотностью электронных состояний на уровне Ферми этих сплавов. Легирование никеля элементами, снижающими плотность электронных состояний на уровне Ферми, уменьшает растворимость волокон в никелевой матрице. Окончательное подавление взаимной растворимости компонентов композиционного материала достигается насыщением матрицы материалом волокна.

Эти же факторы подавляют образование интерметаллидов на границах раздела. Последнему способствует также легирование матрицы элементами, усложняющими структуру возникающих интерметаллидов и повышающими энергию их образования.

В основе ативированной рекристаллизации волокон лежит проникновение материала матрицы по границам зерен волокна и инициирование растворноосадительного механизма перекристаллизации дефектного волокна через более легкоплавкую прослойку. Начальная стадия этого процесса свя-

зана с образованием на волокне вдоль границ зерен «канавок травления», что обусловливает резкое падение прочности волокон без видимой их рекристаллизации. Подавление растворимости волокна в матрице приводит к подавлению и активированной рекристаллизации.

Развитые представления позволили создать ряд термически стабильных композиционных материалов на основе никеля и алюминия, армированных вольфрамовыми, молибденовыми, стальными и углеродными волокнами.

3. Проведены работы по созданию методом направленной кристаллизации эвтектических композиций типа полупроводник-металл. Выявлена группа перспективных систем сплавов на основе кремния и германия. Получены эвтектические композиции, способные поляризовать инфракрасное излучение в диапазоне 2—24 мкм. Испытания в ИОА СО АН СССР показали полную возможность их использования для изготовления термически стабильных поляризаторов мощных лазерных излучений.

На базе разработанных эвтектических композиций могут быть созданы приемники инфракрасного излучения, сочетающие свойства фотоэлектрического и теплового приемников с высокой чувствительностью и расширенным в длинноволновую область диапазоном действия. Показана возможность их использования в преобразователях оптического изображения с целью повышения разрешающей способности, для изготовления многоострийных ненакаливаемых катодов с высокой эмиссионной способностью. Внедрение последних позволит резко увеличить к. п. д., надежность и срок службы электровакуумных приборов.

Получены эвтектические композиции с многослойными гетеропереходами, пригодные для полупроводниковой техники, и композиции с высоким магниторезистивным эффектом для электротехники.

4. В области порошковой металлургии проведены систематические исследования закономерностей и механизмов активированного спекания порошков металлов, сплавов и соединений.

Установлен принципиально новый механизм активированного спекания порошков с дефектной структурой. Показано, что активатор проникает в спекаемые частицы по дефектам их структуры, активирует первичную рекристаллизацию и обусловливает пластическое течение порошковой смеси под действием сил поверхностного натяжения в режиме сверхпластичности. Изменением степени дефектности порошков можно существенно влиять на режимы спекания и качество конечного продукта. Разработаны практические рекомендации направленного варьирования пористости материала, получаемого методом активированного спекания.

Предложен и детально изучен метод активации спекания малоокисленного алюминиевого порошка с использованием жидкой эвтектической фазы. Данный метод позволяет эффективно нейтрализовать отрицательное влияние на спекание окисной пленки и получать спеченные изделия с остаточной пористостью в пределах 2—3%.

Подобный подход использован также для контактной диффузионной сварки алюминиевых деталей в сложных конструкциях. Разработки внедряются в промышленность для получения различного рода алюминиевых изделий.

5. Изучены закономерности внутреннего окисления сплавов на основе никеля, молибдена и ниобия и разработана технология получения данным методом термически стабильных жаропрочных материалов.

Основные параметры структуры, образующейся при внутреннем окислении сплавов с различными легирующими добавками при постоянных температуре, давлении кислорода и концентрации легирующих добавок, зависят от энергии образования окисла. С увеличением последней уменьшается средний размер окисных частиц, увеличивается их число в единице объема, улучшается состояние границ зерен.

Исследована кинетика зарождения частиц окислов при внутреннем окислении. Показано, что зарождение частиц окислов происходит в несколько стадий. Первой стадией является образование дендритной структуры, которая в дальнейшем развивается в дискретную структуру окисных частиц, равномерно распределенных в матрице. Изучена структура и состав окисных частиц в зависимости от выбранной композиции и параметров внутреннего окисления. Получены жаропрочные никелевые сплавы с равномерно распределенными тонкодисперсными окисными частицами.

Предложен метод получения внутреннеокисленных сплавов на основе никеля с однородным по глубине распределением частиц тугоплавких окислов путем внутреннего окисления в условиях переменного парциального давления кислорода.

Показано, что в условиях малой диффузионной подвижности атомов замещения в сплавах на основе молибдена и ниобия процессы формирования неметаллической фазы при насыщении образцов кислородом отличны от классического механизма внутреннего окисления и связаны с образованием пересыщенного по кислороду твердого раствора и последующего старения.

Впервые изучены закономерности внутреннего окисления в условиях высокой плотности дефектов кристаллического строения. Экспериментально доказана возможность создания в этом случае структур с однородным по глубине распреде-

лением высокодисперсной неметаллической фазы типа тугоплавких окислов.

III. Пластичность и прочность

1. На основе систематического исследования поведения металлов и разного класса сплавов на стадии перехода от упругой к однородной макроскопической деформации выявлены общие закономерности и особенности развития микропластической деформации и формирования предела текучести в моно- и поликристаллах. Опираясь на эти данные, предложена схема и теория зарождения, формирования и распространения полосы Людерса в поликристаллах.

Развита статистическая теория микропластической деформации и предела текучести поликристаллов металлов и сплавов при объединенном подходе к рассмотрению этого процесса с точки зрения физики твердого тела и механики сплошных сред. При построении теории учтена определяющая роль зарождения новых дислокаций и неоднородности напряженного состояния поликристаллического агрегата, обусловленная различной ориентацией зерен и наличием таких поверхностей раздела, как границы зерен и поверхность образца, в развитии микропластических сдвигов и постепенном вовлечении зерен в пластическую деформацию. Установлена связь между подвижностью дислокаций и характеристиками микропластической деформации.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили выяснить, в какой мере развитие микропластической деформации определяется свойствами отдельных дислокаций, а в какой — поликристалличностью, и вскрыть физическую природу микропластической деформации и предела текучести поликристаллов разного класса сплавов. Установлено, что с самого начала амплитудная зависимость внутреннего трения связана с протеканием микропластической деформации, механизм ее такой же, как и при активном нагружении.

2. Изучены закономерности и механизм сверхэластичности и памяти формы в сплавах с термоупругим мартенситом.

В результате изучения неупругого поведения сплавов на основе TiNi установлено, что в зависимости от числа и последовательности фазовых переходов наблюдается от одного до трех различных проявлений памяти формы, а также целый комплекс новых неупругих свойств, таких, как безгистерезисность восстановления материалом своей формы, повышенная пластичность в предмартенситной области, знакопеременная обратимая память формы, высокая степень демпфирования в области фазового перехода. Обнаружен ряд особенностей при восстановлении материалом своей ис-

ходной формы (разброс степени и интервалов восстановления формы, подвижность фазовых переходов при циклировании, нестабильность развиваемых напряжений). Установлено, что эти особенности связаны с различной подвижностью межфазных границ и различной способностью материалов к накоплению пластической составляющей деформации при мартенситном превращении.

Разработана термомеханическая обработка сплавов, включающая деформационный наклеп (в режиме активной пластической деформации), фазовый наклеп (в режиме термоциклирования через интервалы фазовых переходов), а также упрочняющее влияние частиц вторых фаз, выделяющихся при высокотемпературном отжиге. Изучено влияние легирующих добавок на эффекты памяти формы и на другие неупругие свойства сплавов на основе TiNi. Используя указанные легирующие добавки и предложенную термомеханическую обработку, можно управлять параметрами памяти формы и создавать материалы со степенью восстановления формы до 100% и развиваемого усилия до 75 кг/мм^2.

Все это в совокупности позволяет расширить промышленные возможности использования сплавов на основе никелида титана. Проводится широкая программа внедрения разработанных сплавов на основе никелида титана и технологических рекомендаций их получения. Предложенная технология получения прутков никелида титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с последующей экструзией внедряется в авиационной промышленности. Успешно завершены испытания данных материалов в электронной промышленности (герметизация интегральных схем), медицине (соединение костных переломов, зубное протезирование).

3. Исследованы механизмы деформации и закономерности деформационного упрочнения моно- и поликристаллов сплавов при изменении дисперсности, формы и пространственного распределения частиц новой фазы, когерентно и некогерентно связанных с матрицей. Показано, что в сплавах с некогерентными выделениями второй фазы высокий коэффициент деформационного упрочнения обусловлен дальнодействующим упругим взаимодействием скользящих дислокаций с дислокационными образованиями на частицах новой фазы. При наличии периодического пространственного распределения частиц вторичных фаз подавляются процессы динамического дислокационного возврата.

Предложен метод оценки роли дальнодействующих напряжений и процесса динамического возврата в формировании высокого коэффициента упрочнения гетерофазных сплавов.

Обнаружено появление дополнительного механизма деформации — механического двойникования — при выделении когерентной фазы в сплавах с низкой энергией дефекта упаковки. Изучена роль мультиплетности скольжения в монокристаллах на развитие механического двойникования в сплавах на стадии выделения когерентных атомно-упорядоченных и неупорядоченных фаз.

Впервые обнаружено явление гомогенного механического двойникования в дисперсно-упроченных монокристаллах. Показано, что указанное явление наблюдается в теоретически предсказанных условиях реализации механического двойникования и сопровождается аномально-высокими эффектами неупругости, связанными с упругим двойникованием. Последнее определяет высокую обратимость формы монокристаллов в гетерогенном состоянии. Изучена температурная и ориентационная зависимость явления гомогенного механического двойникования.

Предложена и экспериментально доказана возможность получения дисперсно-упроченных материалов на основе тугоплавких сплавов ниобия и молибдена с заданным распределением неметаллической фазы путем реализации процессов типа внутреннего окисления. Предложенный метод позволяет повысить кратковременную прочность низколегированных сплавов на основе молибдена и ниобия в интервале температур до 1100—1200°С в 2—3 раза при сохранении удовлетворительной низкотемпературной пластичности и снижения температуры хладноломкости Тх молибденовых сплавов.

Обнаружен и изучен макроскопический эффект механической памяти формы при диффузионных фазовых превращениях образования и распада гидридов в сплавах ванадия и ниобия.

На основе исследований закономерностей прерывистого выделения когерентных γ'-фаз в сплавах разработан новый способ механико-термической обработки широко используемых в промышленности пружинных сплавов типа 36НХТЮ. Предложенный способ приводит к существенному повышению технологичности сплавов и повышению предела упругости, что позволяет повысить классность приборов.

Изучены закономерности формирования субструктуры и процессов ползучести дисперсно-упрочненных сплавов типа ТД-никеля и ВДУ. Показано, что основную роль в формировании и стабилизации структуры и дислокационной субструктуры, образующихся в ходе механико-термической обработки указанного класса сплавов, играют частицы размером не меньше некоторого критического.

Температура начала и характер рекристаллизации сплавов типа ВДУ зависят от дисперсности частиц упрочняющей фазы и парциального давления кислорода в окружающей

среде. Обнаружено, что при медленной рекристаллизации происходит совместная миграция границ зерен и дислокационных субграниц с частицами. Пластическая деформация в условиях ползучести и активного растяжения инициирует протекание медленной рекристаллизации в сплавах с различным типом упрочняющих окислов. Деградация микроструктуры в ходе медленной рекристаллизации приводит к необратимому разупрочнению и ускоренному разрушению при ползучести.

Коллектив металлофизиков Томского университета имеет научные связи со многими научными центрами страны: СО АН СССР, АН УССР, Уральский научный центр АН СССР, институты физики твердого тела, химической физики, металлургии АН СССР, Центральный НИИ черной металлургии, Всесоюзные институты авиационных материалов, легких сплавов, твердых сплавов, цветной металлургии, стандартизации и унификации, кабельной промышленности, ряд ведущих конструкторских бюро, университетов, вузов и др.

Работы томских металлофизиков получили научное признание не только в нашей стране, но и за рубежом. Вот некоторые показатели признания достигнутых успехов за последние десять лет.

Изданы в центральных издательствах шесть монографий, в издательстве ТГУ — сборники докладов двух Всесоюзных совещаний, проведенных в Томске, и 17 учебных пособий. Подготовлен и выпущен тематический номер журнала «Известия вузов. Физика» (Некоторые проблемы физики металлических сплавов). Опубликовано более 800 статей, в том числе 30 в зарубежных журналах и трудах международных конференций. Защищены 6 докторских и более 60 кандидатских диссертаций.

Организованы в Томске 2 Всесоюзных совещания по упорядочению атомов и его влиянию на свойства сплавов (1972 и 1976 гг.), 2 Всесоюзных школы по расчету электронных спектров в металлах и теории фаз в сплавах (1975 и 1978 гг.), 3-й Всесоюзный семинар по смачиванию, адгезии и пайке материалов (1977 г.). Сделаны доклады на 15 международных конференциях, в том числе несколько заказных обзорных. В 1975 г. проф. В. Е. Панин выезжал в Англию для чтения лекций и выступлений на семинарах по физике твердого тела; достижения томской школы металлофизиков получили в университетах Англии высокую оценку.

Результаты научных разработок трижды представлялись на ВДНХ и отмечены одной золотой, одной серебряной и пятью бронзовыми медалями. Народнохозяйственное значение разработок СФТИ неоднократно отмечалось в центральной печати («Правда» от 10 сентября 1970 г.; «Комсомоль-

ская правда» от 30 сентября 1970 г.). Высокая оценка этих работ была дана в передовой статье газеты «Правда» за 23 января 1974 года.

Тематика научных исследований по физике твердого тела в Томском университете тесно связана со специализацией студентов на физическом факультете ТГУ. Все курсы, которые читаются на кафедре физики твердого тела физического факультета, тесно связаны с научной тематикой отдела. Более того, ряд курсов на кафедре ФТТ (электронная структура металлов и сплавов, термодинамика фазовых превращений, теория сплавов) возник на базе соответствующих научных направлений отдела. СФТИ является базой научно-исследовательской работы студентов физического факультета. Под руководством наиболее квалифицированных сотрудников выполняются курсовые и дипломные работы. Отдел является также основной базой производственной практики студентов физического факультета.

Студенты являются соавторами статей, авторских свидетельств, докладов на научных конференциях, отчетов по госбюджетной и хоздоговорной тематике, неоднократно лучшие студенческие работы, выполненные в отделе, награждались грамотами на различных смотрах и конкурсах.

Ежегодно по физике твердого тела защищается 4—6 кандидатских диссертаций. Это позволяет обеспечивать высококвалифицированными кадрами не только Томский университет, но и коллективы других вузов Томска, Сибири и Дальнего Востока. Наличие кадров высокой квалификации и современной научно-исследовательской базы в СФТИ дает возможность стабильно готовить кандидатов и докторов наук по физике твердого тела из числа выпускников ТГУ, целевых аспирантов, преподавателей вузов.

Высокий творческий потенциал металлофизиков Томского университета и их непрерывный рост обусловили возникновение в Томске новых творческих коллективов, успешно работающих в области физики твердого тела. Один из таких коллективов успешно работает в Томском инженерно-строительном институте под руководством бывших сотрудников СФТИ проф. Л. Е. Попова и доц. Э. В. Козлова. В мае 1979 г. на базе отдела металлофизики СФТИ создан новый отдел физики твердого тела и материаловедения в Томском филиале СО АН СССР. Возглавляет этот отдел проф. В. Е. Панин.

Созданная акад. В. Д. Кузнецовым и проф. М. А. Большаниной Томская школа металлофизиков бурно развивается и наращивает свой потенциал. Она должна стать научным центром в области физики твердого тела на Востоке страны и решать крупные народнохозяйственные проблемы, связанные с освоением производительных сил Сибирского региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела, Томск. т. 1, 1932.
2. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск, т. 2, 1941.
3. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск, т. 3, 1944.
4. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск, т. 4, 1947.
5. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск, т. 5, 1949.
6. Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. — М.: Гостехтеориздат, 1954.
7. Кузнецов В. Д. Поверхностная энергия твердых тел. — М.: Гостехтеориздат, 1954.
8. Кузнецов В. Д. Наросты при резании и трении. — М.: Гостехиздат, 1956.
9. Кузнецов В. Д. Основные проблемы механических свойств жаропрочных сплавов. — В кн.: Исследования по жаропрочным сплавам, т. 5, М., 1959.
10. Большанина М. А., Панин В. Е. Скрытая энергия деформации. — В кн.: Исследования по физике твердого тела. — М.: Изд-во АН СССР, 1957.
11. Большанина М. А. Упрочнение и отдых как основные явления пластической деформации. — Изв. АН СССР. Сер. физ., **14**, № 2, 223, 1960.
12. Большанина М. А. Труды СФТИ, вып. 32, 170, 1953.
13. Большанина М. А., Панин В. Е., Дударев К. Ф. ДАН. **152**, вып. 1, 92, 1963.
14. Большанина М. А., Кондратьев П. А. Изв. АН СССР. Металлы, № 4, 120—125, 1968.
15. Panin V. E., Fadin V. P. Phil. Mag., **18**, № 156, 1301—1304, 1968.
16. Попов Л. Е., Козлов Э. В. Механические свойства упорядоченных твердых растворов. — М., Металлургия, 1970.
17. Кащеев В. Н. Абразивное разрушение твердых тел. — М.: Наука, 1970.
18. Панин В. Е., Дударев Е. Ф., Бушнев Л. С. Структура и механические свойства твердых растворов замещения. — М.: Металлургия, 1971.
19. Итоги исследований по физике (1917—1967). Под ред. проф. К. В. Савицкого. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971.
20. Popov L. E., Golosov N. S., Ginzburg A. E., Kodzemyakin N. V., Kozlov E. V. Proc. 3-d Bolton Landing Conference, eds. B. H. Kear, C. T. Sims, N. S. Stoloff, J. H. Wesfbrook. USA, Claifors Publishing division, 1970.
21. Panin V. E., Fadin V. P. e. a. Proc. 3-d Bolfon Landing Conference, eds. B. H. Kear, C. T. Sims, N. S. Sfoloff, J. H. Wesfbrook. USA, Claifors Publishing division, 1970.
22. Panin V. E., Jtin V. J., Dudarev E. F., Kochepasov J. J., Ushakov U. P., Ovcharenko V. E., Zajac J. J. Physics of Sinfering. Spec. issue. 1. pp. 13—27, 1971.
23. Golosov N. S., Popov L. E. L. Ja Pudan. J. Phys. Chem. Solids, **34**, p. 1149—1163, 1973.
24. Panin V. E., Jtin V. J., Dudarev E. F., Ovcharenko V. E., Kocheposov J. J, Phys. of Sinfering. 5, № 2/2, 239—247, 1973.
25. Panin V. E., Fadin V. P. «Order-Disorder Transformations in Alloys», ed. H. Warlimonf. Springer — Verlag — Berlin — Heidelberg — New York, 1974.
26. Popov L. E., Koneva N. A. «Order-Disorder Transformations in Alloys», ed. H. Warlimont. Springer — Verlag — Berlin — Heidelberg — New York, 1974.
27. Коротаев А. Д., Назаров Ю. К., Пшенина Л. С., Конджария Г. Д. ДАН, **221**, № 6, 1975.

28. Доклады IV Всесоюзного совещания по упорядочению атомов и его влиянию на свойства сплавов, ч. 1, 2. Под ред. В. Е. Панина и Н. В. Никитиной. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974.
29. Golosov N. S., Tolstik A. M. J. Phys. Chem. Solids, **35**, p. 1575—1585, 1974; Ibid, **36**, p. 899—907, 1975; Ibid, **37**, p. 273—277, 1976; Ibid, **37**, p. 279—283, 1976.
30. Zhorovkov M. F., Fuks D. L., Panin V. E. Phys. Stat. Sol. (b), **68**. p. 767—773, 1975; Ibid, **68**, p. 379—385, 1975.
31. Fuks D. L., Zhorovkov M. F., Panin V. E. Phys. Stat. Sol. (b), **70**, p. 793—798, 1975; Ibid, **71**, p. 87—92, 1975.
32. Голосов Н. С. Изв. вузов. Физика № 8, 64—82, 1976.
33. Панин В. Е., Жоровков М. Ф., Фукс Д. Л. Изв. вузов СССР, Физика, № 8, 22—39, 1976.
34. Суховаров В. Ф. Изв. вузов. Физика, № 8, 104—117, 1976.
35. Дударев Е. Ф. Изв. вузов. Физика, № 8, 118—132, 1976.
36. Егорушкин В. Е., Нажалов Ю. И., Няврo В. Ф., Фадин В. П. Изв. вузов. Физика, № 8, 7—21, 1976.
37. Elsukova T. F., Mackogon M. B., Bolshanina M. A., Eliseeva M. K. Lead Development Association. London, p. 1—22, 1976.
38. Mackogon M. B., Elsukova T. F., Eliseeva M. K., Bratchikov A. D. Lead Development Association. London, p. 23—30, 1976.
39. Избранные труды В. Д. Кузнецова/Под ред. Г. Д. Полосаткина. — М.: Наука, 1977.
40. Коротаев А. Д., Тюменцев А. Н., Бирюкова Т. А., Щукин А. А., Арбузов В. К. ДАН СССР, **237**, № 2, 1977.
41. Хачин В. Н., Гюнтер В. Э., Монасевич Л. А., Паскаль Ю. И. ДАН, **234**, № 5, 1059, 1977.
42. Khachin V. N., Soloviev L. A. Phys. Stat. Sol. (a), **30**, 651, 1975.
43. Panin V. E., Kochepasov J. J. Sintering Science and Technology. — Jugoslavia, p. 91—93, Belgrad, 1977.
44. Mackogon M. B., Elsukova T. F., Afanasjev N. J., Eliseeva M. K. Annales des Telecommunications, **33**, 9—10, 1978.
45. Упорядочение атомов и его влияние на свойства сплавов/Под ред. В. Е. Панина и А. В. Колубаева. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1978.
46. Кащеев В. Н. Износ при абразиве. В справочнике «Трение, изнашивание и смазка», — М.: Машиностроение, 1978.
47. Суховаров В. Ф., Свитич Ю. В. ДАН, **241**, № 5, 1076—1079, 1979.
48. Панин В. Е., Дударев Е. Ф. В сб.: Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов. Тула, 1979.
49. Сасовская И. И., Щабаловская С. А., Лотков А. И. ЖЭТФ, **77**, 2341—2349, 1979.
50. Shabalovskaja S. A., Lotkov A. J., Sasovskaja J. J., Narmonev A. G., Zakharov A. J. Solid State Communications, **32**, p. 735—738, 1979.
51. Чернов С. С., Паскаль Ю. И., Гюнтер В. Э., Монасевич Л. А., Савицкий Е. М. ДАН СССР, **247**, № 4, 854—857, 1979.
52. Паскаль Ю. И. Термодинамика и кинетика фазовых превращений. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, с. 198, 1977.
53. Паскаль Ю. И. Термодинамический анализ диаграмм состояния двухкомпонентных систем. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, с. 122, 1979.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

А. П. ВЯТКИН, В. И. ГАМАН, М. А. КРИВОВ

Начало исследований по физике диэлектриков в Томском университете относится к 1920 г. и связано с именем В. Д. Кузнецова. Его диссертация «Прохождение электричества через жидкие диэлектрики», защищенная в 1920 г., посвящена исследованию электрических свойств жидкостей, в частности нефти. Впоследствии работы по изучению токопереноса в диэлектриках были продолжены В. Д. Кузнецовым и его сотрудниками [1].

Более интенсивное развитие исследований по физике диэлектриков начинается после открытия Сибирского физико-технического института (СФТИ) в 1928 г. Большой цикл работ по внутреннему фотоэффекту в диэлектриках был выполнен профессором П. С. Тартаковским. Его работы по установлению связи фотопроводимости с наличием локальных электронных уровней в кристаллах, по влиянию магнитного поля на явление внутреннего фотоэффекта и другие [2] были первыми в Советском Союзе.

Второе направление исследований, проводимых в стенах СФТИ, было посвящено изучению свойств изоляторов в сильных электрических полях [3]. Это направление было связано с решением ряда практических задач, возникших в период электрификации восточных районов страны. Вместе с тем в этих исследованиях большое внимание уделялось и физическим явлениям, протекающим в диэлектриках в сильных электрических полях. Так, например, работы А. А. Воробьева по определению электрической прочности технических материалов впоследствии вылились в детальные исследования физики электрического пробоя в кристаллических диэлектриках, в процессе которых была установлена связь электрической прочности кристаллов с энергией кристаллической решетки и другими параметрами [4] (эти работы были завершены уже в Томском политехническом институте).

Работы А. М. Вендеровича и его сотрудников по исследованию электропроводности боросиликатных стекол в сильных электрических полях и высоковольтной поляризации привели к созданию теорий, детально описывающих эти явления

[5—8]. В этих работах, в частности, было показано, что электропроводность стекол в сильных электрических полях возрастает с увеличением напряженности поля по экспоненциальному закону как за счет роста подвижности токонесущих ионов, так и их концентрации. Причем коэффициент α в показателе экспоненты является структурно-чувствительной величиной, и в температурных интервалах полиморфных превращений кремнезема кривая температурной зависимости α имеет максимумы. Эти факты говорили о наличии в реальных боросиликатных стеклах кристаллитов кремнезема и подтверждали кристаллитную гипотезу строения стекла, высказанную академиком А. А. Лебедевым.

Под руководством заведующего лабораторией физики диэлектриков СФТИ и кафедрой электрофизики университета К. А. Водопьянова проводились исследования температурных и частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь широкого класса диэлектриков (слюда, кварц, щелочно-галлоидные кристаллы, электротехнические стекла, глазури, керамика и др.). Эти исследования инициировались необходимостью разработки новых электроизоляционных материалов для электро- и радиопромышленности. Работы в этом направлении были начаты с создания новых измерительных установок, обладающих высокой чувствительностью и позволяющих проводить измерения в широком диапазоне частот [9—12]. Целый ряд разработанных установок не имел аналогов в СССР и за рубежом и в течение длительного времени заимствовался другими научно-исследовательскими учреждениями. Здесь следует отметить установку, созданную В. Н. Кессенихом и К. А. Водопьяновым для измерения диэлектрической проницаемости (ε) и тангенса угла потерь ($\mathrm{tg}\delta$) в материалах с малыми потерями (до 10^{-5} рад) в частотном диапазоне 10^5—10^7 Гц. К. А. Водопьяновым и В. Ф. Ивлевым была создана установка для измерения ε и $\mathrm{tg}\delta$ в веществах с малыми потерями для диапазона частот 3×10^7—3×10^8 Гц. Оригинальными также являются неуравновешенный мост Б. И. Ворожцова для диапазона частот от 20 до 2×10^5 Гц, калориметрическая установка для проведения измерений в сильных электрических полях при высоких частотах и температурах, комплекс оборудования для изучения электрофизических параметров диэлектриков в процессе облучения ионизирующей радиацией.

Экспериментальные данные, полученные коллективом авторов (Б. И. Ворожцов, А. П. Вяткин, А. П. Изергин, М. А. Кривов, В. А. Преснов, Г. И. Потахова, М. П. Тонконогов и др.) под руководством К. А. Водопьянова, позволили установить механизмы поляризации и диэлектрических потерь в целом ряде материалов, выявить связь между

диэлектрическими потерями и составом диэлектрика, между потерями и параметрами кристаллической решетки щелочно-галлоидных кристаллов [13—16].

После возникновения потребности в радиационно стойких материалах в университете и СФТИ был выполнен большой комплекс работ, посвященных изменению диэлектрических свойств твердых диэлектрических материалов при воздействии на них гамма-лучей [17, 18]. Изменения свойств диэлектриков (электропроводность σ, $tg\delta$, ε и электрическая прочность) исследовались как во время действия гамма-лучей, так и после прекращения облучения. В процессе исследований был открыт отрицательный обратимый радиационно-электрический эффект, который заключается в том, что под действием ионизирующего излучения в полярных материалах происходит уменьшение $tg\delta$, но после прекращения облучения уровень потерь восстанавливается. Изучена связь этого эффекта с полярностью и кристалличностью полимерного материала. Впервые обнаружен и исследован термогаммастимулированный эффект, заключающийся в том, что в кристаллическом полимере, подвергнутом облучению сравнительно небольшими дозами гамма-излучения (10^5 рад), наблюдается слабое изменение электрических свойств. Однако при повторном облучении этого образца наблюдается резкое увеличение σ, $tg\delta$ и заметное увеличение ε. Такой же эффект может быть вызван нагреванием образца. Проведено исследование природы радиационных парамагнитных центров в щелочно-силикатных и щелочно-теллуритных стеклах [19].

В связи с необходимостью оптимизации технологического процесса производства металлокерамических радиоламп в 1955—1960 гг. группа сотрудников (Л. Г. Лаврентьева, М. П. Якубеня и др.) под руководством В. А. Преснова занималась изучением структуры стеатитовых керамик, причин их старения в процессе эксплуатации и физико-химических процессов, обусловливающих образование прочного спая керамики с металлом. Результаты исследований в этом направлении обобщены в монографии [20] и внедрены в производство.

Начиная с 1970 г. основное внимание уделяется исследованию электрофизических свойств (ε, $tg\delta$, σ и т. д.) неоднородных диэлектрических или полупроводниковых материалов, в том числе материалов, состоящих из нескольких компонент [21, 22]. Для таких материалов устанавливается связь между свойствами и составом, разрабатываются неразрушающие методы контроля состава, механических характеристик, влажности и т. д. Эти исследования имеют большое практическое значение, в частности для контроля качества стройматериалов и строящихся объектом.

Систематические исследования по физике полупроводников в университете начались под руководством В. А. Преснова в 1954 г. Основное направление работ было связано с получением и исследованием полупроводниковых соединений типа A^3B^5. В первые годы развития этих работ были выращены кристаллы антимонидов индия и алюминия, арсенида алюминия, индий-висмута. Начиная с 1957 г. основные интересы сотрудников, занимающихся полупроводниками, сосредоточились на арсениде галлия, который является одним из наиболее перспективных материалов в полупроводниковой электронике.

А. П. Изергиным был предложен оригинальный метод отсекания кристаллизационного квазизамкнутого объема с помощью конденсации мышьяка в определенной части установки (так называемый «мышьяковый затвор»). Установка с «мышьяковым затвором» прошла испытания в СФТИ и Гиредмете (г. Москва), а на метод кристаллизации получено авторское свидетельство [23]. Разработка промышленных методов кристаллизации GaAs в Гиредмете проводилась с использованием результатов, полученных в СФТИ. Первые монокристаллы GaAs были получены и исследованы в СФТИ в 1958—1959 гг. Много лет спустя группа сотрудников СФТИ создала оригинальную установку для выращивания кристаллов GaAs в магнитном поле, позволяющую получать кристаллы с более однородным распределением примесей [24]. Эта установка демонстрировалась на ВДНХ СССР и удостоена двух бронзовых медалей.

Опыт, накопленный при выращивании бинарных кристаллов типа A^3B^5, послужил основой для развития работ по синтезу и кристаллизации полупроводников типа $A^2B^4C_2^5$. Основная задача этих работ заключается в установлении оптимальных технологических режимов синтеза и кристаллизации ряда арсенидов ($CdSnAs_2$, $ZnSnAs_2$, $CdGeAs_2$, $CdSiAs_2$) и фосфида $ZnGeP_2$. Наиболее детальные исследования по влиянию состава газовой фазы и давления в ней при выращивании кристаллов методом направленной кристаллизации на физические свойства и структурное совершенство слитков проведено для $CdSnAs_2$, $ZnSnAs_2$ и $ZnGeP_2$ [25].

Одновременно с работами по выращиванию кристаллов исследовалась возможность получения тонких пленок соединений A^3B^5. Еще в 1954—1955 гг. методом Векшинского удалось получить слои GaSb, InSb и AlSb на неориентированной подложке [26]. Однако свойства слоев определялись главным образом поверхностными электронными состояниями, плотность которых была достаточно высока. Целенаправленно менять электрофизические свойства этих поликристаллических пленок путем легирования практически было невозможно.

Более перспективным для получения кристаллов из газовой фазы в то время представлялся метод химических транспортных реакций. В СФТИ работы по получению слоев арсенида галлия методом газофазовой эпитаксии были начаты в 1960 г. Впервые в СССР в качестве транспортных агентов использовались йод и пары воды [27]. В последующие годы под руководством Л. Г. Лаврентьевой был выполнен большой объем экспериментальных работ по кинетике роста и легирования слоев в зависимости от газовой фазы, а также от кристаллографической ориентации подложки [28]. Детальные исследования анизотропии роста и легирования слоев GaAs в большом диапазоне кристаллографических углов были выполнены впервые в 1966—1968 гг. и результаты доложены на втором всесоюзном совещании по исследованию арсенида галлия [29]. Впервые было показано, что использование малоугловых отклонений от сингулярных граней позволяет понизить плотность дефектов роста в слоях GaAs, а также уровень легирования (в том числе и фоновыми примесями), увеличить подвижность носителей заряда [30]. Использование малоугловых отклонений было рекомендовано для промышленности. В настоящее время практически все эпитаксиальные слои GaAs получают на подложках с разориентацией приблизительно 2° от плоскости (100). Проводились электронно-микроскопические исследования структуры фронта кристаллизации, что в совокупности с кинетикой позволило сделать определенные выводы о специфике механизма роста кристаллов из пара при участии химической реакции и высоком давлении [30].

Проводятся исследования по влиянию электрического поля на кинетику роста слоев GaAs, позволяющие извлечь дополнительную информацию о механизме роста, об основных стадиях, лимитирующих рост кристалла и захват примесей [31].

Изучена специфика дефектообразования при газофазовой эпитаксии GaAs. Показано, что наряду с известными дефектами структуры (дефекты упаковки, двойники, дислокации), возникающими на границе растущего слоя с подложкой, при газофазовой эпитаксии образуется новый тип дефекта структуры — центр торможения ступеней (ЦТС), обусловленный перемещением частиц второй фазы фронтом кристаллизации [32]. При этом в объеме эпитаксиального слоя появляются примесные неоднородности цилиндрической формы, которые могут быть ответственными за деградацию приборов, изготовленных на основе этого слоя.

Выполнен цикл работ по изучению природы переходных слоев, образующихся на границе эпитаксиального слоя с подложкой. Установлены механизмы формирования этих слоев. Исследовано влияние переходных слоев на параметры

р-п-переходов и найдены способы их подавления [33]. Результаты этих работ переданы отраслевым организациям.

Кроме GaAs исследования кинетики и механизма газофазовой кристаллизации проводились для Ge, InAs, $ZnGP_2$ [34—36]. Последним двум материалам уделяется значительное внимание в настоящее время.

Начиная с 1977 г. проводятся теоретические расчеты состава равновесной газовой фазы и равновесных адсорбционных слоев [37]. Эти расчеты показали, что адсорбционный слой при газофазовой эпитаксии GaAs достаточно плотен (занято 40—80% мест на поверхности), но большая часть мест занята чужеродными атомами (хлор, водород). Содержание компонентов арсенида галлия (мышьяк, галлий) не превышает десятых и сотых долей процента от общего числа мест на поверхности.

Решение важнейших научных и практических задач физики полупроводников определяется возможностью получения материала с заданными свойствами, которые существенно зависят от наличия неконтролируемых и специально введенных дефектов. В связи с этим одно из наиболее обширных направлений работ по полупроводникам связано с исследованием природы, механизма образования, параметров дефектов и их влияния на физические свойства кристаллов. Эти исследования ведутся под руководством М. А. Кривова.

На первом этапе исследовались свойства полученных в лаборатории СФТИ полупроводниковых кристаллов типа A^3B^5 [38]. В дальнейшем исследования были направлены на выяснение особенностей поведения центров с глубокими уровнями (ГУ), созданных термообработкой при различных термодинамических режимах, диффузией примесей и ионизирующим излучением как в элементарных, так и в сложных полупроводниках.

Исследовано влияние примеси Ti на электрофизические свойства Ge, определена энергия ионизации дефектов в Ge, легированном Ti, и показана возможность создания диффузионных р-п-переходов на основе такого материала [39]. Проведено исследование физических свойств монокристаллов Ge, легированного Au до концентраций, близких к предельной растворимости. При этом выяснены некоторые общие закономерности в поведении примесей с ГУ при высоком уровне легирования. Установлено влияние структурного совершенства кристаллов на растворимость, химическую активность, энергетический спектр и рекомбинационные свойства центров с ГУ [40].

Изучено влияние термообработки на свойства GaAs при вариации условий термообработки и свойств исходных кристаллов, определены энергетический спектр, концентрация,

степень компенсации и рекомбинационные параметры термодефектов [41]. Показано, что явление термоконверсии GaAs обусловлено диффузией Cu, дефектами решетки и остаточными примесями.

Рассмотрены особенности поведения быстродиффундирующих примесей (Cu, Au) в GaAs в широком интервале температур диффузии и концентрации носителей заряда в исходном материале, установлено влияние этих параметров на энергитический спектр и концентрацию дефектов [42, 43]. Обнаружен различный характер влияния примеси Cu на электрофизические и рекомбинационные параметры GaAs с высокой концентрацией Te и Sn. Впервые показана возможность практического использования GaAs, легированного Cu, в качестве материала для изготовления чувствительных фоторезисторов инфракрасного диапазона. Разработана лабораторная технология получения такого материала и созданы фотоприемники. Исследуются свойства GaAs, легированного элементами подгруппы железа (Mn, Fe) [44] и тонких диффузионных слоев, полученных диффузией Cu, Mn и Fe.

Эти работы велись в совокупности с исследованиями процесса диффузии в GaAs ряда наиболее важных с практической точки зрения примесей. Впервые проведены систематические исследования диффузии элементов четвертой (Ge, Si, Sn) [45], шестой (S, Se, Te) [46] групп периодической системы элементов и элементов переходной группы железа (Cu, Mn, Fe, Co, Cr) [47, 48], а также элементов второй группы (Zn, Mg) [49, 50]. Определены константы процесса диффузии примесей и их зависимости от термодинамических параметров. Исследованы условия образования структурных дефектов кристаллической решетки при диффузионном легировании GaAs. Установлены причины возникновения таких дефектов и определены условия получения совершенных диффузионных слоев и p-n-переходов. Впервые исследованы свойства p-n-переходов на основе дырочного GaAs, полученных диффузией Ge, Si, Sn, Se [51] и π-γ-переходов, образующихся при диффузии элементов переходной группы железа в электронный GaAs [52]. На основе совместных исследований в этом направлении с отраслевым институтом созданы S-диоды, которые могут использоваться в качестве формирователей импульсов тока с большой амплитудой и субнаносекундными фронтами, а также в качестве быстродействующих переключателей с оптическим управлением [53].

В начале 70-х гг. начаты исследования физико-химических свойств тройных соединений типа $A^2B^4C_2^5$, которые являются ближайшими электронными и кристаллохимическими аналогами соединений A^3B^5 и обладают целым рядом свойств,

делающих эти материалы перспективными для применения в нелинейной оптике, оптоэлектронике и микроэлектронике. Выяснение взаимосвязи между условиями выращивания, термообработки и физическими свойствами соединений $CdSnAs_2$ и $ZnGeP_2$ позволило решить ряд вопросов «самолегирования» этих соединений и идентифицировать некоторые дефекты [54]. Изучена растворимость, электрическая и химическая активность атомов меди, а также энергетический спектр уровней, связанных с примесью меди в этих кристаллах [55]. Проведены исследования фотоэлектрических, оптических и люминесцентных свойств кристаллов $CdSnAs_2$, $CdGeAs_2$, $ZnGeP_2$. Показано что на основе соединения $CdSnAs_2$ может быть создан эффективный анализатор поляризованного ИК-излучения.

Исследования радиационных эффектов были начаты с изучения влияния рентгеновского излучения на электрофизические свойства Ge, Si и на характеристики диодов на их основе [56]. Затем изучалось влияние облучения электронами и протонами на свойства CaAs и соединения типа $A^2B^4C_2^5$. В облученном CaAs обнаружена полоса поглощения при $h\gamma = 1{,}0$ эВ, определена скорость ее введения и область термической стабильности. Установлено, что появление этой полосы поглощения связано с образованием вакансий [57]. Обнаружен эффект кластерирования точечных дефектов в облученном электронами CaAs при последующем отжиге. Показано, что кластеры имеют высокую термическую стабильность и аналогичны по своим свойствам дефектам, возникающим под действием нейтронного облучения [58]. Впервые исследованы свойства ряда соединений A^3B^5 и $A^2B^4C_2^5$ с большими концентрациями радиационных дефектов. Показано, что все сильнодефектные кристаллы этих соединений имеют p-тип проводимости независимо от исходного типа проводимости, что объясняется особенностью распределения локализованных состояний в запрещенной зоне. В области низких температур эти образцы характеризуются наличием прыжковой проводимости по дефектным состояниям в запрещенной зоне. Исследования радиационных дефектов в соединениях $A^2B^4C_2^5$ [59] позволили впервые получить кристаллы $ZnSnAs_2$ n-типа проводимости, осуществить конверсию типа проводимости в $CdSnAs_2$ и в $CdGeAs_2$, получить высокоомные кристаллы на основе соединений $CdSiAs_2$, $ZnSiAs_2$, тройных фосфидов и твердых растворов A^3B^5—$A^2B^4C_2^5$. Обнаружено просветление кристаллов $ZnGeP_2$ в примесной области спектра после облучения. Проведенный комплекс исследований позволяет установить общие тенденции в изменении свойств соединений A^3B^5 и $A^2B^4C_2^5$ под действием ионизирующих излучений.

С момента основания СФТИ проводятся работы, связанные с изучением взаимодействия света с веществом. В 30-х гг. под руководством проф. П. С. Тартаковского, а затем проф. В. М. Кудрявцевой исследовались фотоэлектрические явления в кристаллах [60], фотохимические процессы [61]; в 40-х гг.—поглощение и излучение окислов [62]. Эти исследования в дальнейшем сформировались в два основных направления: 1) изучение радикало-рекомбинационной люминесценции (продолженное в Томском политехническом институте учеником В. М. Кудрявцевой проф. В. А. Соколовым [64]); 2) изчение люминесценции кристаллофосфоров (развитое в СФТИ под руководством Ф. И. Вергунас и К. В. Шалимовой). Основное внимание в этих исследованиях уделено температурным зависимостям фотолюминесценции фосфоров. Ф. И. Вергунас и ее сотрудники существенно уточнили теорию температурного гашения люминесценции кристаллофосфоров и с учетом энергетического спектра примесных центров цинксульфидных фосфоров дали объяснения ряду особенностей в температурных зависимостях их свечения [64]. К. В. Шалимова на примере иона таллия в щелочно-галоидных пленках показала основные закономерности в спектрах поглощения и фотолюминесценции, обусловленные изменением энергетического состояния иона активатора в зависимости от основы сублимат-фосфора и концентрации активатора [65].

Изучение процессов, происходящих в кристаллофосфорах при фотолюминесценции, потребовало глубокого исследования не только чисто оптических, но и электрических свойств этих веществ. В начале 50-х гг. в СФТИ под руководством профессора Ф. И. Вергунас началось интенсивное изучение сульфида цинка, одного из классических кристаллофосфоров. Эти работы являлись одними из первых в Советском Союзе. Были установлены критерии двух известных к тому времени разновидностей фотодиэлектрического эффекта — истинного изменения диэлектрической проницаемости кристаллов за счет поляризации дефектных центров и кажущегося изменения ε за счет фотопроводимости. Кроме того, был выявлен и исследован новый механизм фотодиэлектрического эффекта, связанного с ограниченным перемещением свободных зарядов по центрам захвата [66].

Важная роль центров захвата свободных зарядов была установлена и для процесса возбуждения [67] электролюминесценции сульфида цинка. Было показано, что основным механизмом возбуждения является ударный с участием сильных локальных электрических полей в микрокристаллах. Центры захвата влияют и на последующий процесс рекомбинации возбужденных центров свечения со свободными зарядами, определяя температурную зависимость электро-

люминесценции, релаксационные изменения яркости («волны яркости»), частотные характеристики излучения.

В дальнейшем под руководством П. Е. Рамазанова были поставлены работы по эпитаксиальному выращиванию пленок сульфидов и селенидов цинка и кадмия, изучению их электрических, фотоэлектрических и люминесцентных свойств, получению гетероструктур на основе этих пленок и арсенида галлия и исследованию их характеристик [68].

Несмотря на «неидеальность» таких структур, обусловленную различием параметров решетки компонентов и их коэффициентов термического расширения и связанную с этим большую плотность поверхностных состояний в области гетероперехода, изучаемые структуры оказались интересными по целому ряду свойств. В первую очередь — по своим фотоэлектрическим характеристикам. Так, структура, полученная эпитаксиальным наращиванием CdS на GaAs, имеет весьма низкоомную пленку сульфида кадмия и может быть использована в качестве фотоэлемента.

Структуры ZnS—GaAs, ZnSe—GaAs имеют бистабильные электрические состояния, в которые они могут быть переведены как электрическим, так и оптическим сигналом. Выбором параметров подложки (арсенида галлия) и условий эпитаксии халькогенидной пленки, при которых происходит легирование подложки компонентами пленки, можно получить излучение из арсенида галлия в области гетероперехода и вывести его без потерь через широкозонный материал пленки. Все эти особенности гетероструктур халькогениды—арсенид галлия позволяют надеяться на использование их в оптоэлектронной полупроводниковой технике.

Экспериментальное изучение электрических, оптических и фотоэлектрических свойств элементарных и сложных полупроводников сопровождалось исследованиями по теории полупроводников, проводимых под руководством В. А. Чалдышева и Г. Ф. Караваева. Основное внимание было уделено изучению энергетического спектра электронов в полупроводниках. Разработаны методы теоретико-группового анализа зонного спектра и правил отбора для некоторых процессов в твердых телах. Развит аппарат теории нагруженных копредставлений пространственных групп [69], получены компактные формулы для вычисления правил отбора, исследованы законы дисперсии носителей заряда для большой группы кристаллов [70, 71]. Дано обобщение применяемого для исследования зонного спектра метода возмущений Германа на случай возмущений, изменяющих не только точечную, но и трансляционную симметрию кристалла [72]. Этот метод использован при расчете изменений в зонном спектре при переходе от некоторых кристаллов A^3B^5 к их кристаллохимическим аналогам $A^2B^4C_2^5$.

Методом псевдопотенциала вычислены зонные спектры большой группы полупроводников $A^2B^4C_2^5$, $A^1B^3C_2^6$ [73]. Основные результаты работ по исследованию зонного спектра полупроводников с решеткой халькопирита нашли отражение в коллективной монографии [74]. Они были использованы при интерпретации особенностей спектров отражения и электроотражения полупроводников $A^2B^4C_2^5$ [75].

Созданы программы, позволяющие вычислять не только зонный спектр во всей зоне Бриллюэна, но и рассчитывать различные интегральные характеристики полупроводника. С их помощью проведены расчеты зонного спектра, плотностей состояний, мнимой части диэлектрической проницаемости K_3Sb, Na_2KSb, $ZnGeAs_2$ [76, 77], которые позволили дать надежную интерпретацию оптическим спектрам. Кроме того, для $ZnGeAs_2$ вычислено распределение электронной плотности, что позволило сделать выводы о характере химической связи в этом соединении [78], а для соединений K_3Sb, Na_3Sb, Na_2KSb, K_2CsSb, которые используются в качестве материала для эффективных фотокатодов, рассчитаны показатели преломления и поглощения, коэффициенты отражения и пропускания в пленке, квантовый выход фотоэмиссии и распределение фотоэмитированных электронов по энергиям. Полученные результаты послужили основой для построения теоретической модели оптических переходов и фотоэлектронной эмиссии из этих сурьмяно-щелочных кристаллов.

Разработана методика построения кристаллического псевдопотенциала сложных соединений с использованием модельных псевдопотенциалов ионов, входящих в состав соединения. Предложена простая формула для локальных псевдопотенциалов ионов II—VI групп таблицы Менделеева [79]. Разработана методика учета нелокальных поправок к псевдопотенциалу. С использованием таких псевдопотенциалов проведен расчет зонного спектра соединений типа A^2B^6, A^3B^5 и кристаллов из элементов IV группы таблицы Менделеева, а также большой группы тройных и четверных твердых растворов на основе соединения A^3B^5. Полученные данные позволили провести интерпретацию оптических спектров ряда систем, в частности исследовать характер изменения спектров электроотражения в некоторых твердых растворах в зависимости от концентрации компонент.

Сотрудники СФТИ и университета одними из первых приступили к разработке методов расчета поверхностных состояний. В результате проделанной работы созданы теоретические основы расчета поверхностных состояний, показана глубокая связь локализованных электронных состояний с аналитическими свойствами блоховских волн и зонных энергий как функций комплексного квазиимпульса [80].

Позднее теория поверхностных состояний была сформулирована на языке поверхностных функций Грина. На основе развитой теории были проведены расчеты поверхностных состояний в модели с разрывным на границе потенциалом для полупроводников Si, GaAs и Ge [81]. Опубликован обзор по теории поверхностных состояний [82].

Проведена работа по изучению примесных электронных состояний. Показано, что наличие быстроменяющегося потенциала вблизи примеси приводит к появлению примесных состояний в разрешенной зоне (резонансов) [83] и чисто локальных состояний в запрещенной зоне, связанных с дополнительными экстремумами зон [84].

Исследована пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости простых полупроводников в модели с изотропной энергетической щелью в спектре электронов. Проанализирована длинноволновая асимптотика диэлектрической функции, ее анизотропия, поправки на локальное поле [85]. В связи с задачами изучения примесных состояний построена теория экранирования, справедливая вблизи примесного центра [86].

В последние годы значительное внимание уделяется изучению материалов, пригодных для целей нелинейной оптики в инфракрасной области спектра (например, соединения $A^1B^3C_2^6$ и $A^2B^4C_2^5$). В связи с этим развита теория колебаний кристаллической решетки соединений со структурой халькопирита [87]. В модели жестких ионов, связанных короткодействующими силами с ближайшими соседями, рассчитаны колебательные спектры ряда соединений этого класса, построена теория дисперсии диэлектрической проницаемости в ИК-диапазоне [88], что позволило объяснить анизотропию оптических свойств указанных соединений. Были определены величины эффективных зарядов ионов, характеризующих химическую связь в этих полупроводниках.

В связи с возможностями практического использования плазменных неустойчивостей выполнен цикл работ по исследованию некоторых вопросов теории винтовой неустойчивости [89, 90]. Построена линейная теория поверхностно-винтовой неустойчивости в сильных магнитных полях, рассмотрены некоторые вопросы линейной теории объемно-винтовой неустойчивости, неустойчивости плосковолновых возбуждений плазмы в образцах с геометрией пластинки и полупространства. Показано, что возникновение колебаний тока при возбуждении винтовой волны может быть обусловлено ее искажением за счет малой поперечной составляющей магнитного поля или за счет другого возмущения, нарушающего аксиальную симметрию задачи. При этом частота колебаний совпадает с частотой винтовой волны, что и наблюдается на эксперименте. Для собственной плазмы

полупроводника с геометрией пластинки при малой объемной и поверхностной рекомбинации построена теория «винтовой» неустойчивости при непараллельных электрическом и магнитном полях.

В приближении малой надкритичности развита нелинейная теория поверхностно-винтовой неустойчивости для полупроводника с равными подвижностями электронов и дырок [91]. Показано, что режим возбуждения поверхностно-винтовой неустойчивости является мягким, что нелинейное взаимодействие винтовой волны с самой собой приводит к появлению нулевой, второй и более высоких гармоник и способствует ограничению роста ее амплитуды. Рассчитаны амплитуда винтовой волны, нелинейный сдвиг частоты, рост сопротивления образца при возбуждении в нем винтовой волны. Развитая теория хорошо описывает наблюдающиеся на эксперименте закономерности. Для геометрии полупространства построена нелинейная теория «винтовой» неустойчивости, не ограниченная какими-либо условиями на параметры плазмы. Показано, что при определенных условиях возможен взрывной характер развития «винтовой» неустойчивости, обусловленный электрическими полями, сопровождающими винтовую волну [92].

Большое внимание уделялось разработке приборов различного назначения на основе исследуемых полупроводников. При этом основная задача этой работы, проводимой под руководством А. П. Вяткина, заключалась в установлении физических закономерностей, проявляющихся при взаимодействии полупроводников с металлами и изучении зависимости электрических и фотоэлектрических свойств реальных контактных структур от условий их образования.

Исследованы все основные типы контактных структур: точечные и плоскостные контакты металл-полупроводник, обычные и туннельные p-n-переходы, гетеропереходы и омические контакты, создаваемые с помощью различных технологических процессов (электрохимическое осаждение и напыление, вплавление и жидкостная эпитаксия, диффузия). Изучались структуры на основе Ge, Si, соединений A^3B^5 и их твердых растворов, но основным объектом исследования являлся GaAs. В итоге проведенных исследований установлено, что механизм образования, структуру, геометрию и зависящие от них электрические свойства контактов определяют условия образования контакта, физические свойства полупроводника и металла и физико-химические взаимодействия между ними [93].

Для точечных контактов установлено существенное влияние электрической формовки на структуру приконтактной области полупроводника и на характеристики контакта [94].

Проведен большой цикл исследований по разработке методики создания «тесного» контакта металл-полупроводник, изучению природы выпрямляющего барьера и механизмов токопереноса на контактах арсенида галлия с различными металлами [95]. При этом показано, что высота барьера определяется плотностью поверхностных состояний в GaAs и не зависит от работы выхода металла. Установлено влияние условий изготовления на механизм токопереноса и электрические характеристики контактов. Для создания диодов с барьером Шоттки, имеющих стабильные параметры, необходимо формировать выпрямляющие контакты с минимальным промежуточным слоем, т. е. с идеальными характеристиками. В связи с этим выявлены оптимальные технологические условия получения таких диодов, разработана методика электрохимического получения контактов, устраняющая окисный зазор, изучены межфазные взаимодействия и изменение структуры контактов в процессе термообработки [96].

Проведены детальные исследования процессов образования сплавных контактов различных металлов с Ge, Si, GaAs, GaSb [93, 97]. Существенное внимание уделялось изучению влияния кристаллографической ориентации полупроводника на свойства переходов. В связи с этим были разработаны методики определения ориентации кристаллов GaAs и GaSb с помощью световых фигур [98].

Установленным закономерностям анизотропии явлений смачивания, растворения, эпитаксии дана единая физическая интерпретация на основе понятия о поверхностной энергии, рассчитанной для главных граней полупроводниковых кристаллов. Рентгеновскими и микроскопическими методами изучена структура переходных слоев в системе полупроводник-металл, рассчитана и экспериментально изучена анизотропия механических напряжений в контактах и определены условия образования структур с минимальными напряжениями [93, 99]. Детально изучена зависимость электрических свойств сплавных и эпитаксиальных переходов от ориентации поверхности полупроводника, температурного режима и среды при сплавлении и эпитаксии [100]. Впервые решена задача создания вырожденных сплавных р-п-переходов на основе электронного GaAs с любой исходной концентрацией носителей заряда.

Проведенный цикл исследований позволил выявить закономерности анизотропии свойств рекристаллизованных слоев в соединениях A^3B^5. Анизотропия электрических характеристик р-п-переходов связана с различным распределением примесей и дефектов в рекристаллизованных слоях и области р-п-перехода на различных кристаллографических поверхностях полупроводника. Причем характер анизотропии леги-

рования зависит и от типа легирующей примеси. Показано также, что тип примеси и характер свойств атомов полупроводника в расплаве (поверхностная активность, инактивность) определяют и смачивание полупроводника расплавом [101]. Установлено, что анизотропность характеристик имеет место не только для обычных р-п-переходов, но и для туннельных на основе GaAs и GaSb, а также для невыпрямляющих контактов.

Естественным продолжением цикла работ по исследованию процесса сплавления явилось изучение жидкофазной эпитаксии. В этом плане проведено исследование влияния кристаллографической ориентации подложки, температуры начала эпитаксии, обработки подложки, лигатуры раствора-расплава на характеристики эпитаксиальных слоев и р-п-переходов в GaAs [102]. Полученные результаты использованы для усовершенствования технологии различных типов диодов на основе GaAs (лазерные, высокотемпературные и др.) и позволили в дальнейшем разработать туннельные датчики давления.

Разработана методика жидкостной эпитаксии одного из перспективных (в частности, для оптоэлектроники) твердого раствора $Al_xGa_{1-x}Sb$, рассчитана диаграмма состояний квазибинарной системы Ga—AlSb. Отработана методика выращивания достаточно совершенных слоев $Al_xGa_{1-x}Sb$ с плоской границей подложка-пленка и с заданным распределением Al по толщине пленки. Изучен процесс легирования твердых растворов при жидкофазовой эпитаксии. Установлена зависимость характеристик р-п-переходов, гетеропереходов и барьеров Шоттки на основе $Al_xGa_{1-x}Sb$ от состава твердого раствора, что позволило определить перспективы его применения в оптоэлектронике [103].

Показано, что свойства диффузионных р-п-переходов в GaAs практически не зависят от кристаллографической ориентации поверхности полупроводника, но сильно зависят от других условий их изготовления (давление паров As при диффузии, температурный режим и поверхностная концентрация диффузанта) [104].

Начиная с 1971 г. изучается влияние различного рода деформаций на характеристики туннельных диодов и диодов с барьером Шоттки. Установлена связь между механизмом токопереноса и зонной структурой деформированного полупроводника, предложены модели механизмов сдвиговой и объемной тензочувствительности туннельных диодов и диодов с барьером Шоттки, исследованы причины возникновения нестабильностей электрических характеристик приборов под давлением и найдены способы их устранения, предложены конструкции высокочувствительных преобразователей

давления, обладающих высокой механической прочностью и линейной зависимостью тока от давления [105—108].

Закономерности тензоэлектрических явлений использованы для исследования энергетического спектра носителей заряда в полупроводниках. Из зависимости пикового тока туннельного диода от давления определены энергетические зазоры между основным и побочными минимумами в GaAs, оценены барические коэффициенты этих зазоров и эффективной массы легких дырок, установлено, какому минимуму принадлежат примесные состояния, участвующие в токопереносе в GaSb.

Вся совокупность исследований по зависимости свойств реальных контактных структур от условий изготовления и внешних воздействий привела к разработке ряда новых полупроводниковых приборов, часть из которых уже выпускается серийно: а) точечно-контактные и поверхностно-барьерные сверхбыстродействующие импульсные диоды на основе GaAs; б) туннельные переключающие диоды и структуры пикосекундного диапазона на GaAs n-типа проводимости; в) быстродействующие германиевые и кремниевые p-i-n-фотодиоды и фотодиоды с вольтамперной характеристикой S-типа; г) эпитаксиальные туннельные диоды из GaAs как чувствительные элементы для датчиков и преобразователей давления.

По просьбе ряда отраслевых НИИ, занимающихся разработкой и выпуском полупроводниковых приборов, в 1960—1964 гг. выполнена серия работ по выбору надежных методов защиты поверхности бескорпусных приборов от окружающей среды. В качестве защитных покрытий были опробованы халькогенидные стекла различных систем [109, 110]. В итоге проделанной работы установлено, что халькогенидные стекла играют роль геттера, поглощающего различного рода загрязнения с поверхности полупроводникового прибора. Пленка стекла влагонепроницаема и выдерживает термоциклирование. Все это позволило рекомендовать халькогенидные стекла в качестве защитных покрытий. Синтезировано боро-силикатное стекло с коэффициентом термического расширения, близким к величине этого параметра для кремния и со сравнительно низкой температурой плавления [111], что позволяет использовать его в качестве защитного покрытия для кремниевых приборов.

В процессе выполнения этих работ возникла необходимость в определении скорости поверхностной рекомбинации на поверхности готового полупроводникового прибора до и после нанесения защитного покрытия. Эту задачу проще всего было решить, используя переходные процессы в полупроводниковых диодах с тонкой базой. В связи с этим, а также в связи с разработкой быстродействующих импульс-

ных диодов, проводимой в то время многими организациями, в период с 1962 по 1969 г. под руководством В. И. Гамана был выполнен цикл работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию переходных процессов в полупроводниковых приборах (диод, фотодиод, транзистор).

В этих работах проведен теоретический анализ всех видов переходных процессов в диодах с тонкой базой при произвольном значении скорости поверхностной рекомбинации на невыпрямляющем контакте или на свободной поверхности базы диода [112—114]. Анализ показал, что скорость протекания переходных процессов в таких диодах определяется объемным временем жизни неосновных носителей заряда в базе диода, скоростью поверхностной рекомбинации, толщиной базы, величиной и направлением напряженности «встроенного» электрического поля, если оно существует. С помощью зарядного уравнения проведено описание переходных процессов в диодах с тонкой базой с учетом емкости р-п-перехода.

При тех же допущениях проведен анализ кинетики фотодиода в режиме вентильной фото-э. д. с. при освещении его прямоугольным импульсом света. Получено зарядовое уравнение для фотодиода и с его помощью описаны переходные процессы с учетом емкости р-п-перехода [115].

На основе полученного в теории выражения для времени релаксации переходных процессов разработаны экспериментальные методы определения скорости поверхностной рекомбинации на свободной поверхности базы диода (S) или на невыпрямляющем контакте ($S_к$) [116, 117]. Определены S и $S_к$ для германиевых и кремниевых диодов. Для германиевых диодов установлена зависимость S от окружающей атмосферы, режима сушки после травления, уровня инжекции и удельного сопротивления базы. Исследована зависимость $S_к$ от удельного сопротивления базы германиевых диодов. Показано, что для приближенной оценки S на поверхности базы германиевого транзистора можно использовать спад послеинжекционной э. д. с. на эмиттерном переходе при обратносмещенном и разомкнутом коллекторе [95].

С помощью переходных процессов изучено влияние механического одноосного и анизотропного давления на время жизни неосновных носителей заряда в базе полупроводниковых диодов и на скорость поверхностной рекомбинации [119, 120]. Исследовано влияние магнитного поля на переходные процессы в германиевых диодах с толстой и тонкой базами [121].

Переходные процессы в совокупности с изучением вольтамперных характеристик были использованы для оценки качества защитных покрытий на полупроводниковых диодах.

Такая методика позволяет на одном и том же приборе определять изменение S, обратного тока и пробивного напряжения под действием защитного покрытия.

Этим циклом работ практически была подведена черта под теоретическими и экспериментальными исследованиями переходных процессов в полупроводниковых диодах, проводимыми в нашей стране и за рубежом.

С целью установления возможности создания тонкопленочных активных элементов и функциональных приборов (электронные переключатели, элементы памяти, генераторы переменного тока и т. д.), потребляющих малую мощность в процессе работы и необходимых прежде всего для миниатюризации ЭВМ, начиная с 1965 г. проводятся исследования электронных процессов в тонкопленочных структурах на основе стеклообразных полупроводников. До 1975 г. в основном велись работы по исследованию эффектов переключения и памяти в структурах на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), ванадиево-фосфатных и свинцовоборосиликатных стекол, на основе некоторых окислов (PbO, V_2O_5, TeO_2) и тройного соединения $CdGeAs_2$ в стеклообразном состоянии [122—126]. Работы, выполненные в этом направлении, были одними из первых в Советском Союзе и за рубежом.

В период с 1975 по 1979 год проведены детальные исследования механизма токопереноса в тонкопленочных структурах металл-ванадиево-фосфатное стекло-металл, обладающих устойчивым эффектом долговременной памяти [127—129]. Эти исследования позволили установить энергетический спектр электронов в пленке стекла, показать, что перенос тока осуществляется поляронами малого радиуса, и определить ряд параметров теории поляронов малого радиуса. Изучены особенности токопереноса в сильных электрических полях и в переменном поле. Показано, что свойства таких структур существенно зависят от технологического режима их изготовления и дальнейшей термической обработки в атмосфере воздуха.

Аналогичные исследования проведены и для тонкопленочной структуры металл — ХСП ($As_{30}Te_{48}Ge_{10}Si_{12}$) — металл, которая может выполнять функцию симметричного переключателя без памяти [130]. Здесь основное внимание уделено механизму токопереноса в сильных электрических полях, вплоть до порогового поля, при котором происходит переключение прибора из состояния с высоким сопротивлением в состояние с высокой проводимостью. Впервые показано, что участок вольтамперной характеристики, на котором наблюдается экспоненциальный рост силы тока с напряженностью поля, может быть описан на основе теории ударной ионизации глубоких уровней, если под ГУ понимать локали-

зованные состояния, расположенные вблизи уровня Ферми. Исследованы также частотные и температурные зависимости проводимости и диэлектрической проницаемости. Полученные при этом данные позволяют детально обсудить возможные механизмы токопереноса в переменном поле для изучаемого ХСП.

Из представленного обзора видно, что практически все направления, по которым велись исследования в области физики полупроводников и диэлектриков сотрудниками университета и СФТИ, возникали из потребностей практики. В то же время большинство выполненных работ не являлись чисто прикладными, а носили характер фундаментальных исследований, в которых детально изучалась физика электронных процессов в полупроводниках, диэлектриках и в приборах на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. Д. ЖТФ, **7**, в. 20—21, 1937.
2. Тартаковский П. С. ЖЭТФ, **4**, в. 1, 1934.
3. Воробьев А. А. Труды СФТИ, **3**, вып. 2, 3, 1932.
4. Воробьев А. А., Завадовская Е. К. ДАН, **81**, 375, 1951.
5. Вендерович А. М., Черных В. И. ЖТФ, **18**, 1943.
6. Вендерович А. М. ЖТФ, **23**, 282, 1953.
7. Преснов В. А., Гаман В. И. ЖТФ, **27**, в. 5, 1957.
8. Гаман В. И., Красильникова Л. М. ДАН (Химическая технология), **116**, № 5, 838, 1957.
9. Кессених В. Н., Водопьянов К. А. ЖТФ, **2**, 273, 1932.
10. Водопьянов К. А., Ивлев В. Ф. ЖТФ, **8**, в. 17, 1938.
11. Ворожцов Б. И. ПТЭ, № 1, 112, 1959.
12. Ворожцов Б. И., Нестеров В. М., Замотринская Е. А., Филатов И. С. Изв. вузов. Физика, № 4, 163, 1962.
13. Водопьянов К. А. ЖТФ, **19**, в. 9, 1067, 1949.
14. Воробьев А. А., Водопьянов К. А. ДАН, XCIV, 3, 1954.
15. Воробьев А. А., Водопьянов К. А., Кривов М. А. ДАН, XCVI, 6, 1135, 1954.
16. Водопьянов К. А., Потахова Г. И. Изв. вузов. Физика, № 1, 36, 1957.
17. Водопьянов К. А., Ворожцов Б. И., Потахова Г. И., Ольшанская Н. И. Электричество, № 5, 60, 1960.
18. Нестеров В. М., Несмелова Е. С., Ольшанская Н. И., Михайлова Т. Г., Потахова Г. И. ФТТ, **4**, вып. 11, 3010, 1962.
19. Михайлова Т. Г., Глазунов О. М., Замотринская Е. А. Изв. АН СССР. Геохимия, **6**, 746, 1971.
20. Преснов В. А., Новодворский Ю. Б., Якубеня М. П. Основы техники и физики спая. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1961.
21. Загоскин В. В., Замотринская Е. А., Нестеров В. М. Изв. вузов СССР. Строительство и архитектура, № 2, 146, 1977.
22. Загоскин В. В., Замотринская Е. А., Михайлова Т. Г., Нестеров В. М. Изв. вузов СССР. Физика, № 9, 40, 1978.
23. Изергин А. П., Черниговская В. Н., Калашников А. П. Авт. свид. СССР, № 169064. Б. И., 1965, № 6.
24. Вайдеров Г. Ф. ПТЭ, № 2, 221, 1972.
25. Вяткин А. П., Воеводин В. Г., Грибенюков А. И., Кривов М. А., Крыгин В. В., Морозов В. С. В сб.: Получение, свойства и применение фосфидов. — Киев: Наукова думка, 1977.
26. Преснов В. А., Сыноров В. Ф. ЖТФ, **27**, 123, 1957.

27. Преснов В. А., Лаврентьева Л. Г., Вилисова М. Д. Авт. свид. СССР, № 161707. Б. И., 1964, № 8.
28. Лаврентьева Л. Г., Нестерюк Л. Г., Ивлева О. М., Якубеня М. П. Сб.: Процессы роста и структура монокристаллических слоев полупроводников. — Новосибирск: СО АН СССР 1968.
29. Лаврентьева Л. Г., Якубеня М. П. В сб.: Арсенид галлия, вып. 2. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1969.
30. Лаврентьева Л. Г., Вилисова М. Д., Ивонин И. В. и др. В сб.: Процессы роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок, ч. I. — Новосибирск: Наука, 1975.
31. Лаврентьева Л. Г., Иконникова Г. М., Ивлева О. М., Красильникова Л. М. Кристаллография, **23**, 350, 1979.
32. Вилисова М. Д., Лаврентьева Л. Г., Пороховниченко Л. П., Дорохов А. Н., Сапрыкин А. И. Изв. вузов. Физика, № 10, 96, 1978.
33. Лаврентьева Л. Г. В сб.: Арсенид галлия, вып. 6. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975.
34. Лаврентьева Л. Г., Захаров И С. Кристаллография, **15**, вып. 4, 854, 1970.
35. Александрова Г. А., Ивонин И. В., Красильникова Л. М., Лаврентьева Л. Г., Шубин А. Е., Якубеня М. П. Сб. тезисов «Физика соединений A^3B^5». Л., 1978.
36. Нестерюк Л. Г. Тезисы докладов пятого всесоюзного совещания по росту кристаллов, т. 2. Тбилиси, 1977.
37. Chernov A. A., Rusaikin M. P. J. Cryst. Growth., **45**, 73, 1978.
38. Преснов В. А., Кривов М. А., Изергин А. П. и др. Труды IV совещания по полупроводниковым материалам. «Вопросы металлургии и физики полупроводников». — М.: Изд-во АН СССР, 1961.
39. Кривов М. А., Малисова Е. В., Преснов В. А., Чернова Н. В. Изв. вузов СССР. Физика, № 2, 104, 1962.
40. Воеводин В. Г. Автореферат кандидатской диссертации. Томск, 1975.
41. Кривов М. А., Малисова Е. В., Попова Е. А. Изв. вузов СССР. Физика, № 3, 69, 1973.
42. Каменская И. В., Кривов М. А., Малисова Е. В. и др. Изв. вузов. Физика, № 9, 11, 1979.
43. Войцеховский А. В., Захарова Г. А., Кривов М. А., Малисова Е. В., Петров А. С. ФТП, **13**, 640, 1979.
44. Антонов В. В., Войцеховский А. В., Кривов М. А. и др. IV всесоюзная конференция по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М., 1979.
45. Хлудков С. С. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, **7**, 2, 310, 1971 и др.
46. Хлудков С. С., Лаврищев Т. Т., Преснов В. А. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1968.
47. Хлудков С. С., Приходько Г. Л., Лаврищев Т. Т., Карелина Т. А., Тарасова Л. К. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, **8**, 6, 1044, 1972.
48. Хлудков С. С., Тарасова Л. К. ФТТ, **16**, 5, 1319, 1974.
49. Хлудков С. С., Машнин С. В., Преснов В. А. В сб.: Арсенид галлия. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1968.
50. Захаров Б. Г., Хлудков С. С. Изв. вузов. Физика, № 6, 18, 1966 и др.
51. Хлудков С. С., Вяткин А. П., Преснов В. А. В сб.: Физика р-п переходов. — Рига: Зинатне, 1966.
52. Хлудков С. С., Толбанов О. П., Лахтикова В. Г. Радиотехника и электроника, **18**, 9, 1883, 1973.
53. Божкова Е. В., Иванов Л. П., Каримбаев Д. Д. и др. ПТЭ, № 3, 253, 1978.

54. Вяткин А. П., Воеводин В. Г., Грибенюков А. И. и др. В сб.: Получение, свойства и применение фосфидов. — Киев: Наукова думка, 1977.
55. Брудный В. Н., Воеводина О. В., Кривов М. А. ФТП, **10**, 7, 1311, 1976.
56. Кривов М. А., Малянов С. В. Изв. вузов. Физика, № 6, 150, 1967.
57. Brudnyi V. N., Groza A. A., Brailovskii E. Yu. Rad Damage and Defects in Semicond. (Inst. Phys. Conf. Ser. 22, p. 72), 1972.
58. Брудный В. Н., Браиловский Е. Ю. ФТП, **5**, 1248, 1971.
59. Brudnyi V. N., Krivov M. A., Melev V. G., Potapov A. I. Phys. Stat. Sol. (a), **50**, 379, 1979.
60. Tartakowsky P. Zeitschr. für Physik, **90**, 504, 1934.
61. Kudrjawzewa W., Prilashajewa N. Acta Physicochimica, 8, 211, 1938.
62. Кудрявцева В. М. ДАН, **52**, 585, 1946.
63. Соколов В. А. УФН, **47**, 537, 1952.
64. Вергунас Ф. И. Изв. АН СССР. Сер. физ., **13**, 122, 1949.
65. Шалимова К. В. Тр. СФТИ, № 24, 209, 1947.
66. Вергунас Ф. И., Рамазанов П. Е. Изв. АН СССР. Сер. физ., **24**, 214, 1960.
67. Рамазанов П. Е., Нуварьева В. В. Изв. вузов. Физика, № 5, 145, 1968.
68. Лупин В. М., Рамазанов П. Е. Изв вузов. Физика, № 2, 110, 1977.
69. Чалдышев В. А., Кудрявцева Н. В., Караваев Г. Ф. Изв. вузов. Физика, № 2, 46, 1963.
70. Караваев Г. Ф. ФТТ, 3676, 1964.
71. Чалдышев В. А., Ратнер А. М. Изв. вузов. Физика, № 2, 20, 1973.
72. Караваев Г. Ф., Поплавной А. С., Чалдышев В. А. ФТП, 2, 113, 1968.
73. Gorynova N. A., Poplavnoi A. S., Polygalov Yu. I. and Chaldyshev V. A. Phys. Stat. Sol., **39**, 9, 1976.
74. Полупроводники $A^2B^4C^5_2$. Под ред. Н. А. Горюновой, Ю. А. Валова. — М.: Сов. радио, 1974.
75. Горюнова Н. А., Белле М. Л., Златкин Л. Б. и др. ФТП, 2, 1344, 1968.
76. Мостовский А. А., Чалдышев В. А., Киселев В. П., Климин А. И. Изв АН СССР. Сер. физ., **40**, № 12, 2490, 1976.
77. Чалдышев В. А., Киселев В. П., Захаров Н. А. В сб.: Химическая связь в кристаллах и их физические свойства, т. 2. — Минск: Наука и техника, 1976.
78. Чалдышев В. А., Захаров Н. А., Золотарев М. Л. Депонировано ВИНИТИ, № 4284-77.
79. Чалдышев В. А., Гриняев С. Н., Катаев С. Г. Депонировано ВИНИТИ, № 2219-79 Деп.
80. Степанов В. Е., Чалдышев В. А. ФТТ, **12**, 1963, 1970.
81. Горюнов В. А., Чалдышев В. А., Чернышев В. Н. ФТП, **12**, 1898, 1978.
82. Степанов В. Е., Чалдышев В. А., Чернышев В. Н. В сб.: Проблемы физической химии поверхности полупроводников. — Новосибирск: Наука, 1978.
83. Степанов В. Е., Козлов А. В. ФТТ, **12**, 3426, 1970.
84. Степанов В. Е. Совещание по глубоким центрам в полупроводниках. Тезисы докладов. Одесса, 1972.
85. Тютерев В. Г. ЖЭТФ, **67**, 1552, 1974.
86. Степанов В. Е., Дворецкий В. Я. ФТТ, **15**, 1895, 1973.
87. Poplavnoi A. S., Tjuterev V. G. J. de Physique (France), **36**, с. 3—169, 1975.

88. Поплавной А. С., Тютерев В. Г. ФТТ, 17, 1055, 1975.
89. Успенский Б. А. ФТП, 4, 814, 1970.
90. Караваев Г. Ф., Ципивка Ю. И. ФТП, 8, 50, 1974.
91. Караваев Г. Ф., Успенский Б. А. Изв. вузов. Физика, № 3, 82, 1974.
92. Караваев Г. Ф., Успенский Б. А., Чуприков Н. Л. Изв. вузов. Физика, № 11, 1979.
93. Вяткин А. П. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1968.
94. Вяткин А. П., Вилисов А. А. Изв. вузов. Физика, № 6, 25, 1969.
95. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Поплавной А. С., Степанов В. Е., Чалдышев В. А. ФТП, 4, вып. 5, 915, 1970.
96. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Катаев Ю. Г., Батеньков В. А. Изв. вузов. Физика, № 11, 86, 1967.
97. Гермогенов В. П., Вяткин А. П. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974.
98. Вяткин А. П., Федоров Н. К. Изв. вузов. Физика, № 2, 107, 1970.
99. Мисик А. М., Вяткин А. П. Изв. вузов. Физика, № 3, 7, 1971.
100. Вяткин А. П., Васильев А. П. Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 5, 51, 1968.
101. Кулиш У. М., Вяткин А. П. В сб.: Рост кристаллов, 8, ч. 2. — М.: Наука, 1968.
102. Кулиш У. М., Васильев А. П., Вяткин А. П., Елисеев П. Г., Гермогенов В. П. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1970.
103. Вилисов А. А., Гермогенов В. П. Изв. вузов. Физика, № 7, 10, 1977.
104. Хлудков С. С., Машнин С. В., Лаврищев Т. Т., Вяткин А. П., Преснов В. А. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1968.
105. Алексеева З. М., Вяткин А. П., Криворотов Н. П. ФТП, 11, 222, 1974.
106. Криворотов Н. П., Вяткин А. П., Щеголь С. С. ПТЭ, № 2, 226, 1977.
107. Alekseeva Z. M., Vyatkin A. P., Karavaev G. F. and Krivorotov N. P. Phys. Stat. Sol. (b), 88, 321, 1978.
108. Вяткин А. П., Максимова Н. К., Филонов Н. Г. ФТП, 12, в. 7, 1384, 1978.
109. Гаман В. И., Сироткин А. А., Стенина В. М. В сб.: Поверхностные свойства полупроводников. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
110. Сироткин А. А., Гаман В. И., Михайлова Т. Г., Преснов В. А. В сб.: Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
111. Сироткин А. А., Гаман В. И., Преснов В. А. Авт. свид. СССР, № 180770, заявл. 01.07.1963. Б. И., 1966. № 8.
112. Гаман В. И. Изв. вузов. Физика, № 1, 50, 1965.
113. Гаман В. И. Изв. вузов. Физика, № 2, 119, 1966.
114. Гаман В. И. Изв. вузов. Физика, № 12, 129, 1967.
115. Гаман В. И. ФТП, 3, вып. 2, 226, 1969.
116. Гаман В. И., Калыгина В. М. В сб.: Электронные процессы на поверхности и в монокристаллических слоях полупроводников. — Новосибирск: Наука, 1967.
117. Гаман В. И., Калыгина В. М., Балтаков Ф. Н. Изв. вузов. Физика, № 11, 124, 1968.
118. Гаман В. И., Калыгина В. М. Изв вузов. Физика, № 10, 132, 1967.

119. Гаман В. И., Агафонников В. Ф. Изв. вузов. Физика, № 10, 36, 1968.
120. Гаман В. И., Агафонников В. Ф. Изв. вузов. Физика, № 12, 141, 1969.
121. Гаман В. И., Калыгина В. М. ФТП, **4**, вып. 8, 1504, 1970.
122. Гаман В. И., Базаров В. Д. Р и Э., **12**, вып. 7, 1967.
123. Гаман В. И., Базаров В. Д. Изв. вузов. Физика, № 10, 7, 1968.
124. Гаман В. И., Калыгина В. М. Изв. вузов. Физика, № 8, 31, 1972.
125. Калыгина В. М., Гаман В. И., Минаев В. С., Топалова Л. И. Изв. вузов. Физика, № 8, 59, 1974.
126. Гаман В. И., Бадлуев А. И. Изв. вузов. Физика, № 3, 50, 56, 1975.
127. Гаман В. И., Калыгина В. М., Ряннель Э. Ф. Изв. вузов. Физика, № 2, 102, 107, 1976.
128. Ряннель Э. Ф., Гаман В. И., Косинцев В. И. Изв. вузов. Физика, № 2, 92, 1977.
129. Калыгина В. М., Гаман В. И., Ряннель Э. Ф., Бояринцев А. И. Изв. вузов. Физика, № 8, 80, 1978.
130. Бадлуев А. И., Гаман В. И., Минаев В. С. Изв. вузов. Физика, № 8, 64, 1979.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В. Н. ДЕТИНКО

Развитие радиоэлектроники — учения о технических средствах радио, неразрывно связано со становлением многих новых отраслей науки и техники, которые зародились вместе с открытием радио и на основе радио. Колыбелью радиоэлектроники была старая радиотехника с ее приемо-передающей аппаратурой для беспроволочной электросвязи и радиовещания. Последнее с первых дней Советской власти приобрело особое значение для нашей страны, являясь, по образному выражению В. И. Ленина, «газетой без бумаги и расстояний». В 20—30-е гг. появились первые электронные приборы, первые шаги делало телевидение, зарождалась радиолокация, стали выходить первые научные журналы. Однако эти годы были, по существу, периодом вынашивания радиоэлектроники, подготовительным этапом к бурному ее расцвету в 40-е и 50-е гг. Война дала энергичный толчок развитию радиолокации, радионавигации, электроники, техники сверхвысоких частот (СВЧ) и др. Это во много раз увеличило поле деятельности радиоэлектроники и стимулировало быстрые темпы роста научных исследований по физическим проблемам радиоэлектроники и работ по созданию радиоэлектронной аппаратуры. В послевоенные годы, в период научно-технической революции и освоения космоса, радиоэлектроника приобрела большое народнохозяйственное значение.

Самые первые шаги по развитию радиотехники в Томске связаны с нахождением здесь одного военно-технического учреждения, так называемой 3-й базы радиотелеграфных формирований РККА. Из воспоминаний профессора А. Б. Сапожникова, который с 1919 г. был курсантом школы радиотелеграфистов, эта база располагала несколькими искровыми радиостанциями на конной тяге, уцелевшими от первой мировой войны. Это было довольно разношерстное «хозяйство», в основном иностранного происхождения. Была, например, военная радиостанция фирмы «Телефункен», ко-

торая состояла из передатчика с искровым разрядником Вина и детекторного приемника, располагающихся на одной двуколке. На второй двуколке находились двигатель внутреннего сгорания и генератор переменного тока (1000 Гц), питающий передатчик, а на третьей размещались телескопическая мачта и зонтичная антенна. Были английские кавалерийские станции фирмы «Маркони» с синхронным вращающимся разрядником и детекторным приемником.

Весной 1923 г. в университете было проведено совещание, на котором обсуждался вопрос о привлечении сил науки к активному участию в решении задач социалистического строительства. Председательствующий на этом совещании профессор В. Д. Кузнецов внес предложение основать на физико-математическом факультете университета специализацию «электромагнитные колебания и волны» (так тогда называли научные основы беспроволочной электросвязи). Предложение было принято и уже в следующем году специализация была открыта. В первые годы преподавание осуществляли работники 3-й базы радиоформирований А. А. Холодовский, который читал общий курс радиотехники, А. Б. Сапожников, обеспечивающий чтение лекций по теории переменных токов, радиотехническим измерениям и проводивший лабораторные занятия. Заведовал новой специализацией В. Д. Кузнецов, а помогал ему А. Б. Сапожников.

Успешное развитие, популярность и авторитет любой новой специальности в вузе во многом зависят от ее актуальности. В ту пору радиотехника, совсем еще новая отрасль, обладала особой привлекательностью, породившей мощное радиолюбительское движение.

В охотниках получить высшую квалификацию по радиотехнике недостатка не было. Но существовало мнение, что в университете не должны заниматься техническими аспектами наук, а радио было все-таки в основном технической новинкой. В такой ситуации большую роль в привлечении студентов и воспитании кадров специалистов университетского профиля играла постановка в университете научной работы в области радиофизики, а следовательно, и радиотехники. Большую помощь в подыскании актуальной научной тематики оказала Нижегородская радиолаборатория им. В. И. Ленина, директором которой был крупнейший радиоспециалист того времени профессор М. А. Бонч-Бруевич. В 1925 г. он предложил включиться в работу по исследованию прохождения коротких радиоволн вдоль трассы Нижний Новгород — Томск. Ректорат университета охотно откликнулся на это предложение и летом 1925 г. сотрудниками и студентами новой специализации была сооружена первая в Сибири коротковолновая приемо-передающая радиостанция для научных исследований. Эта радиостанция (ТУК) со-

стояла из двухлампового передатчика, построенного по двухтактной схеме, четырехлампового регенеративного приемника и волномера. И передатчик и приемник были собраны на отечественных электронных лампах конструкции Бонч-Бруевича. Станция, выполняя свою задачу, проработала до 1929 г.

С 1928 г., когда при университете был открыт физико-технический институт, дальнейшая научная работа в направлении радиоэлектроники проходила в его стенах. Она была связана с аппаратурными аспектами и техническим оснащением начатых в то время работ по исследованию распространения радиоволн и изучению ионосферы, телевидению, акустике и электромагнитной дефектоскопии под общим руководством В. Н. Кессениха. В 1933 г. для исследования ионосферы был разработан и изготовлен коротковолновый передатчик мощностью в 1 кВт, работающий на ряде фиксированных частот, создана необходимая приемная аппаратура [1]. Индикация отраженного от ионосферы сигнала происходила на экране электроннолучевой трубки с круговой разверткой. Передатчик и приемник были разнесены на расстояние 7 км и связаны друг с другом телефонной линией. С помощью этой опытной установки-прообраза ионосферной станции, удалось впервые получить отраженный от ионосферы сигнал и определить высоту ионизированного слоя, приобрести первоначальный опыт и ощутить порядок величин, с которыми приходится иметь дело при проведении ионосферных наблюдений радиотехническими методами, знать, таким образом, какие требования следует предъявить к аппаратуре.

В 1936 г. для наблюдения ионосферы во время полного солнечного затмения в СФТИ была построена первая в Сибири ионосферная станция. При этом пришлось решить немало новых технических задач и чисто научных вопросов, ибо к строящейся ионосферной станции были предъявлены необычайно высокие технические требования. Так, было задумано, кроме наблюдения за ходом высот отражающих слоев, проследить также за изменением критических частот во времени, а это потребовало создания широкодиапазонной приемо-передающей аппаратуры. Кроме того, было решено делать станцию по неразнесенной схеме и в соответствии с ней в одном пункте располагать как мощный передатчик, так и чувствительный приемник. В те времена вопросы совместной работы передатчика и приемника были новыми и малоизученными. В процессе создания станции был выполнен ряд научно-исследовательских работ. Так, Н. Д. Булатов разработал и осуществил оригинальную систему импульсной модуляции передатчика для получения коротких импульсов зондирующего излучения [2]. Этот метод Булатова позволял получать

видеоимпульсы длительностью до 10^{-9} с, предел наступал по причине конечного времени пролета электронов в межэлектродных промежутках генерирующей лампы. Б. Н. Хитров разработал и построил высокочувствительный приемник для приема коротких импульсов, что представляло тогда выдающееся научно-техническое достижение. Интересно отметить, что Б. Н. Хитров был известным активистом движения коротковолновиков-радиолюбителей.

В создании приемного устройства станции принял участие В. Г. Денисов, который предложил и осуществил оригинальный способ автоматической записи высотно-частотных характеристик ионосферы. В то же время он работал в области телевидения. В ту пору развивалось только механическое телевидение, электронное было изобретено, но недоставало еще технических средств для его реализации. В. Г. Денисовым была предложена система двойной развертки [3, 4], позволявшая улучшить качество телевизионного изображения при использовании диска Нипкова. Механическое телевидение по принципиальным причинам оказалось бесперспективным. Однако указанные и подобные им работы имеют глубокий эвристический смысл как исчерпывающие возможности, заключенные в той или иной системе и побуждающие, с одной стороны, к поискам новых решений, а с другой — к анализу причин. Вклад в телевидение, сделанный В. Г. Денисовым, был широко известен радиотехнической общественности, так как о его опытах сообщалось на страницах массового журнала «Радиофронт».

На работах по дефектоскопии, которые проводились в отделе колебаний, были также сосредоточены силы ученых радиотехнического направления. Среди них выдающееся место занимали профессор А. Б. Сапожников и доцент Б. П. Кашкин. Крупный специалист в области теоретических основ радиотехники, имеющий всесоюзную известность как видный ученый по вопросам электромагнитной дефектоскопии, А. Б. Сапожников вместе со своими учениками выполнил большой комплекс работ по теории колебаний, теории нелинейных и автоколебательных систем, радиоэлектронным методам и приборам в дефектоскопии и акустике. Главные научные интересы А. Б. Сапожникова лежали в области теоретических проблем электромагнитной дефектоскопии, электродинамики проводящих сред (металлов), физики магнитных явлений, но и работы по радиоэлектронике имели большой удельный вес в его научном творчестве. Если А. Б. Сапожников — профессионал с теоретическим уклоном, то Б. П. Кашкин, его ближайший сподвижник, был прирожденным экспериментатором, творцом радиоэлектронных схем дефектоскопов, глубоким знатоком радиоэлектронной аппаратуры и большим практиком по части ее эксплуатации.

Он создал множество приборов для контактного использования не только в дефектоскопии рельсовой, подшипников, оболочек кабеля, но и для поиска металлических осколков в теле человека, осциллографирования турбинных лопаток и т. д. К сожалению, никаких публикаций не было сделано.

Существенно отметить, что А. Б. Сапожников и Б. П. Кашкин были заняты педагогической деятельностью и в этом деле им принадлежит исключительная роль. Они взяли на себя основную работу по подъему ряда конкретных направлений радиоэлектроники в СФТИ и ТГУ в послевоенное время, переходу на новые программы обучения студентов, подготовке и прочтению ряда новых курсов, постановке новых учебных лабораторий на уровне современных задач.

По окончании Великой Отечественной войны в связи с необходимостью подготовки специалистов-радиофизиков по отраслям новой техники на физическом факультете университета были открыты новые специализации. Параллельно в СФТИ была развернута научно-исследовательская работа по направлениям физических проблем и техники СВЧ основам радиолокации, исследованию генераторов электрических колебаний СВЧ диапазона и другим важным вопросам.

Ниже приводится обзор работ по отдельным направлениям радиоэлектроники.

I. Исследование автогенераторов электромагнитных колебаний

Сразу следует отметить, что в вопросах поведения автоколебательных систем, особенно систем СВЧ, было много неясного и неизученного. Поэтому был поставлен цикл работ по исследованию атогенераторов в автономном и неавгономном режимах. Особенно большое внимание было уделено вопросам исследовния поведения автогенераторов, подвергающихся внешнему воздействию. При определенных условиях присходит синхронизация — явление, заключающееся в том, что внешний (воздействующий) генератор, даже слабый, навязывает свою частоту автогенератору, во много раз более сильному. Исследование синхронизации преследует прежде всего практические цели. Одна из них — использование синхронизации для стабилизации частоты колебаний автогенераторов в тех случаях, когда другие методы стабилизации уже не действуют. Так, например, в диапазоне СВЧ, где трудно получить мощные колебания со стабильной частотой, для стабилизации мощных генераторов применяется синхронизация от маломощных генераторов, имеющих высокую стабильность (например, молекулярные и атомные стандарты частоты на основе мазеров имеют стабильность

порядка $10^{-11} \div 10^{-13}$). Синхронизация используется в когерентной радиолокации, радионавигации, применяется для сложения мощностей генерирующих систем при их синхронной работе и для многих других целей. С ее помощью можно изучать физические процессы в автоколебательных системах и получать количественную информацию о динамических параметрах генерирующих устройств в разных условиях. Эти цели достигаются тем успешнее, чем более глубоко и полно понято само явление синхронизации, ясна картина установления и хорошо известен механизм удержания синхронного режима.

Синхронизация автогенераторов СВЧ была впервые рассмотрена в работах Ф. М. Клементьева и Э. С. Воробейчикова, выполненных в 1952—1954 гг. под руководством проф. А. Б. Сапожникова. Исследовалась синхронизация триодных и клистронных генераторов, находящихся под воздействием внешнего гармонического колебания. Было обнаружено существенное влияние на ход синхронизации инерции электронов, при этом впервые в общем виде были получены амплитудные кривые синхронизации систем, для которых характерно конечное время пролета заряженных частиц (носителей тока) [5—7]. Синхронизация импульсного магнетрона с целью стабилизации его колебаний была изучена Н. К. Гордиенко, при этом были использован оригинальный метод развязки импульсного внешнего генератора от воздействия магнетрона путем использования однопроводной линии задержки. При этом достигалось строго направленное влияние синхронизирующего генератора на сихронизируемый магнетрон и полное отсутствие обратного действия. Работа Н. К. Гордиенко была первой, в которой экспериментальным путем были изучены нестационарные процессы в синхронизируемом магнетроне. Примерно в это же время В. В. Дегтяревым была проведена работа, проливающая свет на природу генерации магнетрона. Используя концепцию о наведенном токе, он смог создать довольно полную картину электронных процессов и определить динамические характеристики магнетрона [8]. Особое место занимают работы В. В. Дегтярева по расчету траекторий электронов в скрещенных полях. Эта задача сложна, особенно при движении электронов в сильном магнитном поле. Но именно в этом случае оказалось возможным построить усредненную траекторию движения электрона-траекторию центра окружности, по которой с циклотронной частотой вращается электрон. Был определен радиус окружности и впервые рассчитаны «спицы» пространственного заряда магнетрона [9]. Аналогичные работы П. Л. Капицы были проделаны несколько раньше, но опубликованы позднее.

В 60-е гг. было проведено исследование многочастотных систем СВЧ и оптического диапазонов. По замыслу Э. С. Во-

робейчикова, многочастотный автогенератор СВЧ мог рассматриваться как модель оптического квантового генератора, несмотря на все различия в механизме генерации. Первые работы этого плана касались генератора на клистроне и опять-таки были посвящены изучению внешнего воздействия [10, 11]. В этих работах была показана возможность управления формой спектра колебаний многочастотного генератора с помощью внешнего сигнала. Одновременно Б. Н. Пойзнером была решена задача о синхронизации световым сигналом двухчастотного газового ОКГ [12—14]. Анализ полученных зависимостей позволил установить не только различия в физике явлений в СВЧ и оптических многочастотных системах, но и обнаружить ту самую общность свойств, которая лежала в основе постановки задачи. Она проявлялась в однотипности реакции спектра излучения на малый внешний сигнал при различных начальных условиях и в степени конкуренции видов колебаний [15—17]. Такой подход позволил не только решить задачу синхронизации, но и предложить новый стандарт частоты на основе двухчастотного молекулярного генератора [18]. Продолжая обзор работ этого направления, отметим, что для изучения динамики многочастотных автоколебательных систем был предложен статистический метод анализа, состоящий в моделировании процессов установления колебаний при случайных начальных условиях в присутствии внешнего сигнала. В экспериментах с отражательным клистроном и исследованиях на ЭВМ, проведенных с участием Т. С. Портновой, показано, что устойчивость многочастотных систем определяется соотношением коэффициентов усиления видов колебаний, степенью неэквидистантности спектра собственных частот колебательной системы и других факторов [19—22]. Сложность рассмотрения систем с большим числом степеней свободы привела к разработке спектрального метода для решения нелинейных задач теории колебаний [17, 23].

Развитые методы анализа многочастотных автоколебательных систем были использованы для изучения режимов работы диодов Ганна [24—25].

Теоретические и экспериментальные исследования многочастотных ОКГ с внутренней модуляцией оптической длины резонатора приведены в работах Ю. П. Егорова для случая синхронной модуляции [26—27] и Л. Н. Попова для случая несинхронного режима модуляции [28—30]. В результате этих исследований были предложены новые методы измерения девиации частоты [31—32], метод измерения естественной ширины линии излучения ОКГ [33], автогенераторы с расширенным спектром колебаний [34, 35], а также обоснована возможность применения частотно-модулированного режима для изучения физических процессов в ОКГ [30].

Решение ряда практических задач с использованием когерентного лазерного излучения посвящен ряд работ Ю. П. Егорова. Так, например, показано, что для повышения отношения сигнал/шум при распространении пучка через атмосферу или отражении от диффузно-рассеивающих объектов целесообразно использовать двухчастотные сигналы в сочетании с гетеродинным методом приема [36, 37]. Исследование особенностей приема модулированного излучения, рассеянного движущимися объектами, позволило создать лазерный измеритель скорости движения диффузно-рассеивающих объектов [38, 39], а также бесконтактный измеритель малых механических колебаний [40].

В последние годы был выполнен цикл работ по исследованию генерации СВЧ колебаний с помощью диодов Ганна [41, 42]. При этом для получения информации о нелинейных характеристиках активного элемента — диода Ганна — изучался процесс синхронизации от внешнего генератора, действующего по определенной программе. Из числа работ, касающихся исследования природы и механизмов установления синхронизации, следует упомянуть работы М. Н. Мерзляковой по автопараметрическим явлениям при синхронизации генераторов томсоновского типа [43—47]. В них было показано, что при определенных условиях, обычно при малом внешнем воздействии, синхронизация наступает благодаря возбуждению в автоколебательной системе параметрических колебаний на частоте внешнего генератора. При действии более сильных колебаний имеет место другой механизм синхронизации — происходит гашение автоколебаний, в результате чего в системе остаются только вынужденные колебания с частотой внешнего сигнала. Было показано, что характер процесса установления синхронизации коренным образом зависит от того, какой из механизмов реализуется в том или ином конкретном случае.

С 1955 г., как только зародилась полупроводниковая электроника и появились реальные полупроводниковые триоды, в СФТИ были начаты работы по исследованию генерирующих устройств на транзисторах. Первоначально рассматривались электронные процессы в плоскостных транзисторах и находились их характеристики, необходимые для аналитического и экспериментального исследования автогенераторов. Известно, что аналитическое исследование автогенераторов затруднено необходимостью решать нелинейные уравнения, теория которых не так развита, чтобы пользоваться строгими математическими методами. Здесь господствуют расчетно-аналитические подходы интуитивного характера, отвергаемые математиками, но предлагаемые физиками, которые, хорошо представляя физическую суть дела, находят пути решения, сводя объект исследования к достаточно адекват-

ной и математически вполне разрешимой модели. Имея все это в виду, следует учесть также, что транзистор является более сложным прибором, чем электронная лампа, которую он был призван заменить: он имеет резко различные входное и выходное сопротивления, значительную проходную проводимость, а для описания его электрических свойств нужны как минимум четыре вольтамперные характеристики. Исследования по электронике транзисторов, проведенные И. Н. Вожениным и А. С. Майдановским [48—54], дали возможность записать выражения для токов транзистора при произвольном эмиттерном токе и произвольных напряжениях на переходах. Используя эти выражения как нелинейные граничные условия при решении линейного уравнения В. Шокли, описывающего дрейф носителей тока в области базы, авторам указанных работ удалось получить результаты в аналитическом виде и изучить различные колебательные режимы в автогенераторах с емкостной (и индуктивной) обратной связью. Было показано, например, что стационарные колебания устанавливаются либо за счет верхней отсечки коллекторного тока (получается так называемый перенапряженный режим с жестким возбуждением), либо за счет автоматического смещения рабочей точки (недонапряженный режим с мягким возбуждением). При изменении тока эмиттера в перенапряженном режиме происходит чистая угловая модуляция автоколебаний, в недонапряженном режиме изменение тока эмиттера приводит к чистой амплитудной модуляции. На этой основе был выполнен целый ряд работ по управлению колебаниями транзисторных генераторов, исследованы нестационарные процессы, вопросы стабилизации колебаний, рассмотрены фазовые и амплитудные флуктуации установившихся колебаний, измерена естественная ширина линии генерации. При исследовании неавтономных генераторов были получены асимметричные амплитудные кривые синхронизации, характерные для систем с запаздыванием, что связано с временем прохода носителями тока области базы. Таким образом, еще раз было продемонстрировано сходство в поведении колебательных систем с конечным временем пролета зарядами пространства взаимодействия, несмотря на существенное различие механизмов генерации.

2. Исследование усилителей СВЧ диапазона и фотоприемных устройств

С 1959 г. начались работы по исследованию усилителей СВЧ диапазона. К этому времени появились варакторы — полупроводниковые диоды, обладающие свойствами нелиней-

ных конденсаторов. Их барьерная емкость зависима от приложенного напряжения, а омические потери пренебрежимо малы. На таких диодах с 1957 г. стали делать параметрические усилители, которые имели малый уровень собственных шумов и поэтому предназначались для использования во входных цепях высокочувствительных радиоприемников. Особенно было актуально создание радиоприемных устройств СВЧ диапазона, так как именно на частотах этого диапазона осуществлялась связь с искусственными спутниками и их телеуправление с Земли, на этих же частотах велись радиоастрономические наблюдения, развивалась спутниковая связь, телевидение и выполнялось большое количество других задач. В результате исследования систем на нелинейных конденсаторах, проведенных автором и коллективом научных сотрудников, был найден и всесторонне изучен новый режим работы цепи с нелинейным конденсатором — так называемый модуляционный режим. Сущность его состоит в том, что при соответствующей структуре цепи с двумя генераторами СВЧ, имеющими сильно различающиеся частоты, возможно такое состояние, при котором более низкочастотный генератор модулирует электрические колебания более высокой частоты, не затрачивая на это никакой энергии. Если теперь из модулированных высокочастотных колебаний каким-либо путем выделить сигнал, соответствующий более низкочастотным колебаниям, то он будет усиленным по отношению к низкочастотным колебаниям, поступившим в систему. Усилитель, построенный на основе такого свойства цепи с нелинейным конденсатором, позволяет получить на выходной нагрузке сигнал, усиленный за счет вложения части энергии генератора более высокой частоты (генератора накачки), в то время как колебания более низкой частоты, служащие входным сигналом, полностью отражаясь, не поглощаются входной цепью. Работа при полном отражении сигнала является особенностью усилителя, которая состоит в том, что во входной цепи устанавливается режим стоячей волны сигнала. Обычно в усилителях СВЧ диапазона используется режим бегущей волны. Однако режим стоячей волны на входе позволяет при определенных условиях получить лучшие характеристики усиления, чем при использовании традиционно принятого и узаконенного во всех технических устройствах СВЧ диапазона режима полного согласования генератора сигнала с входной цепью (режима бегущей волны). Это было показано в целом ряде работ [55—63]. В них были разработаны принципы модуляционного усиления, теория модуляции и демодуляции в цепях с нелинейными конденсаторами, теория и принципы создания входных цепей малошумящих модуляционных усилителей.

Входные цепи модуляционных усилителей играют существенную роль в механизме усиления, в том числе в достижении высокой чувствительности усилителя. Поскольку для частоты сигнала нелинейный конденсатор имеет чисто реактивное сопротивление и действует под влиянием напряжения сигнала, то согласование невозможно, зато можно с помощью трансформатора повысить напряжение сигнала на варакторе и тем самым добавить усиление. Если к тому же трансформатор не вносит потерь, то он уменьшает шумы усилителя. В работах автора и Б. А. Чеканникова [64, 65] была развита теория трансформации напряжения или тока на реактивные нагрузки (емкость или индуктивность) и проведен синтез необходимых для усилителей оптимальных трансформирующих цепей, которые обеспечивают максимальную величину произведения коэффициента трансформации на ширину полосы частот. К числу таких цепей в СВЧ диапазоне относится трансформатор на основе запредельного волновода. В совместных работах автора с Т. Л. Левдиковой [66—69] проделаны электродинамические расчеты трансформаторов и других цепей СВЧ (резонаторов, фильтров, концентраторов электрического поля), использующих нераспространяющиеся типы колебаний в запредельных электродинамических структурах. Цепи обладают целым рядом ценных свойств, связанных с большим характеристическим сопротивлением, высокой концентрацией электрической энергии в емкостном зазоре, малыми габаритами и эксплуатационными удобствами.

Из других работ по малошумящим усилителям СВЧ диапазона следует упомянуть исследование регенеративных усилителей с бигармонической накачкой. Как известно, регенеративные параметрические усилители имеют высший частотный потолок и способы работать в миллиметровом диапазоне, однако они отличаются значительной нестабильностью усиления. Попытки улучшить стабильность — ценнейшее качество во многих применениях — приводят к потере усиления и к возрастанию шумов. В работах В. И. Левашкина и Ю. К. Тарабрина [63, 70, 71] было предложено использовать для цели стабилизации бигармоническую накачку. При определенных фазовых соотношениях между колебаниями накачек по первой и второй гармоникам существенно понижается чувствительность усиления к вариациям уровня накачек, их частот и напряжения смещения, а также к температурному уходу параметров варактора, в то время как коэффициент шума остается таким же низким, как и в случае одночастотной накачки.

Была сделана попытка распространить результаты, полученные при изучении систем модуляционного усиления, на оптический диапазон волн. Ход рассуждений был примерно

такой. Было показано, что модуляционное усиление тем больше, чем выше частота накачки по сравнению с частотой сигнала. А если это так, то хорошо использовать для накачки достаточно мощное излучение оптического квантового генератора, применив в качестве аналога нелинейного конденсатора электрооптический кристалл дигидрофосфата калия или аммония, помещенный в электрическое поле СВЧ сигнала. И хотя эффективность кристалла во много раз ниже эффективности варактора, можно было ожидать усиления сигнала благодаря огромному превосходству частоты колебаний ОКГ над частотой сигнала. Вследствие разного рода технических причин усиления СВЧ сигнала получить не удалось, зато были выполнены работы по модуляции излучения ОКГ, часть из которых уже упоминалась выше.

В 70-е гг. работы этого направления трансформировались в исследования фотоэлектрических явлений в полупроводниках. Они проводились под руководством А. С. Петрова и завершились разработкой высокочувствительных приемников светового излучения. Полупроводник помещался в электрическое СВЧ поле, сконцентрированное в малом объеме. Для этого были предложены конструкции запредельных резонаторов СВЧ, которые отличались способностью к особо сильной фокусировке электрического поля (СВЧ смещения) на полупроводниковом образце. Главное достоинство СВЧ смещения заключается в отсутствии контактов, что устраняет такие нежелательные явления, как инжекция и экстракция носителей тока через контакты, а также существенно снижает уровень избыточного шума [72—74]. В работах Ю. В. Медведева, А. А. Ушеренко. Г. И. Тюлькова, А. В. Войцеховского были изучены спектры генерационно-рекомбинационных шумов ряда полупроводниковых материалов — кремния [75, 76], германия с золотом и сурьмой, антимонида индия [77, 78], арсенида галлия с различными примесями [79—82], высокочистого германия [83]. Фоторезисторы, созданные на основе исследованных материалов с минимизированными шумами, были использованы как активные элементы высокочувствительных фотоприемных устройств для различного применения [84—88]. Использование СВЧ смещения оказалось перспективным не только в фотоприемных устройствах, но и в детекторах ионизирующих излучений. Как показали теоретические расчеты, выполненные Н. Г. Борзуновым [89—91], здесь можно ожидать значительного улучшения разрешающей способности ядерных детекторов за счет более полного вовлечения во взаимодействие с излучением неравновесных носителей тока.

3. Исследования по физике ферритов и по созданию ферритовых СВЧ-элементов

В послевоенные годы потребности сверхвысокочастотной техники вызвали бурный рост исследований, направленных на поиск новых принципов управления СВЧ энергией. Значительные возможности в этом отношении открыли новые магнитные материалы — ферриты, которые благодаря своим гиромагнитным и диэлектрическим свойствам позволили создать, по существу, новую отрасль техники—ферритовую СВЧ радиоэлектронику. В СССР интенсивные исследования в указанных направлениях начали проводиться в начале 50-х гг.

В 1954 г. по инициативе и при непосредственном участии профессора А. Б. Сапожникова в СФТИ и ТГУ начались работы по изучению физики магнитных явлений в ферритах и использованию их в технике. Работы были начаты выпускниками кафедры электромагнитных колебаний ТГУ А. С. Хлыстовым, М. А. Стельмашенко, А. Н. Елсуковым.

С самого начала был сформулирован комплекс основных задач нового направления: анализ поведения ферритового материала при одновременном воздействии электромагнитного поля СВЧ и постоянного магнитного поля с целью определения материалов, соответствующих тем или иным условиям работы СВЧ-элемента; установление связей электромагнитных параметров (компонент скалярной или тензорной магнитной проницаемости) с другими физическими параметрами феррита; синтеза феррита с заданными свойствами; разработка новых методов измерений. Комплексное решение всех этих задач обеспечивало научно обоснованный подход к проблеме разработки новых магнитных материалов с заданными свойствами и к решению на этой базе различных задач техники СВЧ.

Первая публикация молодых ученых была посвящена изучению поведения ферритов на сверхвысоких частотах [92]. Особое внимание здесь было уделено ферромагнитному резонансу (ФМР). Томских физиков это явление в ферритах привлекло не только как собственно физическое явление, но и как новый перспективный метод изучения ряда важных характеристик магнитных материалов. Кроме того, эффект ФМР позволял создавать невзаимные элементы волноводной техники. Главные усилия были направлены на излучение ФМР в поликристаллических ферритах, поскольку для таких материалов можно было сравнительно легко получить практически любое сочетание фундаментальных физических параметров — спонтанной намагниченности и магнитной

кристаллической анизотропии. Если к 60-м гг. основные вопросы теории ФМР в монокристаллах были разработаны, то переход к поликристаллическим материалам вызывал существенные математические трудности. Исследования в этой области развивались под руководством Ю. Н. Котюкова и были посвящены установлению связи важнейших характеристик ФМР-ширины резонансной линии и величины резонансного поля с магнитострикцией, анизотропией и намагниченностью [93, 94]. Проведенные им исследования привели к обоснованию и разработке новых методик определения констант магнитострикции и магнитной кристаллической анизотропии поликристаллов [95]. Тщательное и глубокое исследование процессов намагничения позволило учесть пористость материала и неоднородность намагничения поликристаллических ферритов, значительно увеличить тем самым чувствительность и точность классического метода определения констант магнитной кристаллографической анизотропии (МКА) из закона приближения к насыщению.

Изучение ФМР в Томске дало толчок к исследованию нелинейных свойств ферритов. Развитая Г. А. Петраковским нелинейная теория спиновых волн в ферритах существенно прояснила физические принципы работы таких нелинейных СВЧ-элементов с ферритами, как усилители, ограничители мощности и т. п.

Теоретические и экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в гиротропных средах проводились под руководством А. С. Хлыстова, а затем Г. А. Редькина. В основном они были направлены на описание взаимодействия намагниченного ферритового материала с СВЧ-электромагнитными полями различной структуры, решение граничных задач электродинамики и определение значений компонент тензора магнитной проницаемости, соответствующих оптимальному использованию ферритового вкладыша в волноводе. Эти характеристики давали информацию для оценки тех физических свойств, которыми должен обладать феррит, чтобы эффективно работать в данном СВЧ-элементе. В частности, подробно были исследованы поведение поперечно- и аксиально намагниченной ферритовой пластины или феррит-диэлектрической структуры в прямоугольном и круглом волноводах [96]. Впоследствии был решен ряд задач по гиротропным свойствам азимутально намагниченного ферритового вкладыша [97]. На основе этих исследований разработана, например, оригинальная конструкция малогабаритного термостабильного ферритового фазовращателя.

Исследования в области физики ферритов были направлены на изучение концентрационных и температурных зависимостей фундаментальных характеристик магнетика —

спонтанной намагниченности и МКА в многокомпонентных соединениях с целью поиска новых магнитных материалов. Была создана собственная технологическая база, позволяющая синтезировать поликристаллические ферриты почти любого состава, а также выращивать монокристаллы. Впервые в СССР В. Н. Селезневым был выращен монокристалл литиевого феррита — материала, нашедшего широкое применение в СВЧ-технике. Исследования были направлены на разработку ферритовых материалов с температурно-стабильными свойствами для длинноволнового участка СВЧ-диапазона. Основы подхода к решению этой задачи были изложены в работе А. С. Хлыстова [98] и развивались далее под руководством С. М. Жилякова [99, 100]. Практическими результатами исследований в этом направлении были новые ферритовые материалы для термостабильных невзаимных устройств. Так, был создан литий-кобальтовый феррит-алюминат для температурно-стабильного резонансного вентиля с высокими параметрами, который был разработан в СФТИ и использован в радиолокационном комплексе обслуживания трасс ГВФ.

Работа над созданием ферритов с заданными свойствами привела к необходимости более глубокого знания факторов, определяющих магнитную структуру ферримагнитных соединений — пространственной ориентации спиновых магнитных моментов катионов и энергии обменных взаимодействий между ними. Для этого в 1969 году были начаты работы по освоению нового мощного метода исследования — магнитной нейтронографии. В 1971 году на Томском ядерном реакторе был пущен в эксплуатацию трехканальный спектрометр нейтронов. На этой экспериментальной базе С. М. Жиляковым и Е. П. Найденым были начаты систематические исследования ферримагнетиков сложного состава [101]. Работа в этом направлении привела к выявлению закономерностей в механизме магнитного упорядочения и зависимости его от состава, атомной структуры, температуры и внешнего поля.

В частности, теоретически было предсказано и экспериментально обнаружено новое явление — последовательность магнитных фазовых превращений в диамагнитно-разбавленных феррошпинелях [102, 103].

Работы томской школы радиоэлектроников, созданной под руководством и при участии профессора А. Б. Сапожникова, широко известны в стране и за рубежом. Многие сотни докладов на научных конференциях, статей и десятки изобретений отражают размах и результаты работы большого коллектива ученых в области современных проблем радиоэлектроники. Питомцы этой школы плодотворно работают в разных городах нашей Родины, во многих университетах и институ-

тах, научных учреждениях и на предприятиях, достойно представляя там высокую марку специалиста, получившего высшее образование и научную подготовку в стенах Томского университета и Сибирского физико-технического института.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапожников А. Б. Труды СФТИ, 1959, 39, 16.
2. Булатов Н. Д. Труды СФТИ, 1936, 4, 83.
3. Денисов В. Г. Труды СФТИ, 1936, 4, 73.
4. Денисов В. Г. Труды СФТИ, 1937, 5, 13.
5. Воробейчиков Э. С., Клементьев Ф. М. Радиотехника и электроника, **1**, 3, 335, 1956.
6. Клементьев Ф. М. Радиотехника и электроника, **1**, 9, 1284, 1956.
7. Воробейчиков Э. С., Клементьев Ф. М. Труды СФТИ, вып. 36, 389, 1958.
8. Дегтярев В. В. Ученые записки Томского государственного университета, вып. 28, 100. 1957.
9. Дегтярев В. В. Известия вузов. Физика, 5, 102, 1958.
10. Воробейчиков Э. С., Корчагин Ю. А., Пойзнер Б. Н. Изв. вузов. Физика, 6, 44, 1970.
11. Воробейчиков Э. С., Киреев А. М., Корчагин Ю. А., Пойзнер Б. Н. Изв. вузов. Радиоэлектроника, **13**, 8, 923, 1970.
12. Пойзнер Б. Н. Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по физике газовых ОКГ. — М.: ФИ АН СССР, 154, 1969.
13. Пойзнер Б. Н. Радиотехника и электроника, **14**, 12, 2179, 1969.
14. Пойзнер Б. Н. Радиотехника и электроника, **16**, 10, 1852, 1971.
15. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н. Радиотехника и электроника, **15**, 9, 1985, 1970.
16. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н. Известия вузов. Радиоэлектроника, **14**, 12, 1519, 1971.
17. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н. Proc. of the VIII Intern. Conf. on Noneinear Oscillations. Prague. (Inst. of Thermomechanics Czechoslovak Academy of Sciences). p. 819, 1978.
18. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н., Сейтнепесов Ч. Авторское свидетельство № 426608. Бюллетень открытий и изобретений. 16, 168, 1974.
19. Воробейчиков Э. С., Замолдинов Р. Ф., Портнова Т. С. Изв. вузов. Физика, 5, 16, 1974.
20. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н., Портнова Т. С. Изв. вузов. Радиофизика, **16**, 1535, 1973.
21. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н. Book of Abstract VII Iiternational Conference on Nonlinear Oscillations. Berlin, 183, 1975.
22. Бердников А. А., Пойзнер Б. Н., Портнова Т. С. Изв. вузов. Радиофизика, **20**, 10, 1499, 1977.
23. Анохин С. К., Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н. Изв. вузов. Физика, 9, 22, 1973.
24. Гоняев Г. С., Замолдинов Р. Ф., Пойзнер Б. Н., Портнова Т. С. Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Генерация СВЧ колебаний с использованием эффекта Ганна». Новосибирск, 1973.
25. Абдрашитов Ф. Р., Пойзнер Б. Н., Портнова Т. С. В сб.: Арсенид галлия. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, вып. 5, 226, 1974.
26. Егоров Ю. П., Петров А. С. Радиотехника и электроника, **12**, 8, 1469, 1967.
27. Егоров Ю. П., Петров А. С. Известия вузов. Физика, 8, 17, 1970.

28. Воробейчиков Э. С., Попов Л. Н. Изв. вузов. Физика, 5, 35, 1971.
29. Воробейчиков Э. С., Парыгин В. Н., Попов Л. Н. Изв. вузов. Физика, 9, 28, 1978.
30. Попов Л. Н., Пивоваров Б. Л., Пойзнер Б. Н. Цидулко И. М. Радиотехника и электроника, **20**, 2, 440, 1975.
31. Гусев В. Г., Попов Л. Н. Радиотехника и электроника, **19**, 9, 1980, 1974.
32. Михеев Ю. С., Петров А. С., Попов Л. Н. Квантовая электроника, **1**, 11, 2523, 1974.
33. Егоров Ю. П. Письма в ЖЭТФ, **8**, 10, 525, 1968.
34. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н., Попов Л. Н. Изв. вузов. Физика, 10, 146, 1970.
35. Воробейчиков Э. С., Пойзнер Б. Н., Попов Л. Н., Фомин В. Д. Изв. вузов. Физика, 4, 157, 1972.
36. Егоров Ю. П. Радиотехника и электроника, **17**, 6, 1312, 1972.
37. Егоров Ю. П., Дунаевский Г. Е. Радиотехника и электроника, **18**, 9, 1966, 1973.
38. Давыдов В. Н., Егоров Ю. П., Пивоваров Б. Л., Трофимов В. А. ПТЭ, 5, 220, 1976.
39. Тузова С. И., Егоров Ю. П., Пивоваров Б. Л., Трофимов В. А. В сб.: Распространение оптических волн в случайно-неоднородной атмосфере. — Новосибирск: Наука, 67, 1979.
40. Егоров Ю. П., Петров А. С. ПТЭ, 4, 184, 1974.
41. Абдрашитов Ф. Р., Воробейчиков Э. С., Кулаев С.П. Радиотехника и электроника, **22**, 11, 2313, 1977.
42. Абдрашитов Ф. Р., Воробейчиков Э. С., Кулаев С. П. Радиотехника и электроника, **23**, 5, 1001, 1978.
43. Детинко В. Н., Мерзлякова М. Н. Изв. вузов. Физика, 5, 109, 1972.
44. Детинко В. Н., Мерзлякова М. Н. Изв. вузов. Радиофизика, **16**, 3, 393, 1973.
45. Детинко В. Н., Мерзлякова М. Н. Изв. вузов. Физика, 3, 27, 1974.
46. Детинко В. Н., Мерзлякова М. Н. Изв. вузов, Физика, 3, 32, 1974.
47. Мерзлякова М. Н. Изв. вузов, Физика, 6, 81, 1975.
48. Важенин И. Н. Изв. вузов. Физика, 6, 14, 1961.
49. Майдановский А. С. Изв. вузов. Физика, 2, 34, 1961.
50. Майдановский А. С. Радиотехника и электроника, 6, 9, 1961.
51. Майдановский А. С. Известия СО АН СССР, 3, 35, 1962.
52. Воженин И. Н. Известия вузов. Радиофизика, 7, 5, 937, 1974.
53. Воженин И. Н. Известия вузов. Физика, 3, 76, 1965.
54. Воженин И. Н. Известия вузов. Физика, 5, 171, 1965.
55. Детинко В. Н., Петров А. С. Изв. вузов. Физика, 6, 90, 1962.
56. Детинко В. Н. Изв. вузов. Физика, 1, 99, 1965.
57. Детинко В. Н., Петров А. С. Изв. вузов. Физика, 3, 14, 1966.
58. Детинко В. Н., Левашкин В. И. Труды СФТИ, вып. 54, 20, 1974.
59. Иванов А. Н., Петров А. С. Радиотехника, 25, 3, 79, 1970.
60. Антипов В. Б., Левашкин В. И., Цыганок Ю. И. Изв. вузов. Радиофизика, **19**, 11, 1765, 1976.
61. Детинко В. Н. Известия вузов. Физика, 12, 111, 1970.
62. Никифоров А. Н., Детинко В. Н. Изв. вузов. Радиоэлектроника, **14**, 5, 552; 1971, **19**, 8, 23, 1976.
63. Левашкин В. И., Тарабрин Ю. К. Известия вузов. Радиоэлектроника, **15**, 3, 405, 1972.
64. Чеканников Б. А., Детинко В. Н. Электросвязь, 10, **56**, 1964.

65. Чеканников Б. А. Изв. вузов. Радиотехника, 7, 3, 322, 1964.
66. Детинко В. Н., Левдикова Т. Л. Радиотехника и электроника, 12, 2, 348, 1967.
67. Детинко В. Н., Левдикова Т. Л. Труды СФТИ, вып. 54, 96, 1974.
68. Левдикова Т. Л., Детинко В. Н. Известия вузов. Радиоэлектроника, 15, 7, 899, 1972.
69. Левдикова Т. Л. Изв. вузов. Физика, 1, 88, 1971.
70. Тарабрин Ю. К., Левашкин В. И. Известия вузов. Радиофизика, 19, 11, 1770, 1976.
71. Тарабрин Ю. К. Известия вузов. Радиоэлектроника, 19, 1, 81, 1976.
72. Медведев Ю. В., Петров А. С., Тюльков Г. И. Изв. вузов. Физика, 10, 7, 1970.
73. Лапатин Л. Г., Петров А. С. Электронная техника, сер. 1, 12, 36, 1972.
74. Петров А. С. Электронная техника, сер. 1, 12, 66, 1973.
75. Медведев Ю. В., Петров А. С. Изв. вузов. Физика, 7, 92, 1972.
76. Медведев Ю. В., Петров А. С., Ушеренко А. А. Известия вузов. Физика, 5, 106, 1975.
77. Петров А. С., Тюльков Г. И. Труды 1-й Всесоюзной конференции «Проблемы передачи информации лазерным излучением». Киев, 1969.
78. Тюльков Г. И., Петров А. С., Соловьев Ю. Л., Бутков В. В. Изв. вузов. Физика, 10, 80, 1974.
79. Антонов В. В., Войцеховский А. В., Лиленко Ю. В. и др. Радиотехника и электроника, 24, 5, 1024, 1979.
80. Антонов В. В., Войцеховский А. В., Дунаевский Г. Е., Петров А. С. Радиотехника и электроника, 23, 10, 2189, 1978.
81. Войцеховский А. В., Захарова Г. А., Кривов М. А., Малисова Е. В. ФТП. 13, 4, 640, 1979.
82. Антонов В. В., Войцеховский А. В., Лиленко Ю. В., Петров А. С. Изв. вузов. Физика, 7, 125, 1977.
83. Лапатин Л. Г., Петров А. С., Солдаткин Н. П., Тюльков Г. И. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции «Фотометрические измерения и их метрологическое обеспечение», М., 36, 1974.
84. Бутков В. В., Донченко В. А., Петров А. С. и др. В сб.: Импульсная фотометрия. — Л.: Машиностроение, 4, 215, 1974.
85. Абрамов В. Г., Лапатин Л. Г., Петров А. С., Тюльков Г. И. Труды II Всесоюзной конференции «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М., 1976, 96.
86. Войцеховский А. В., Лиленко Ю. В., и др. В сб.: Дистанционное зондирование атмосферы. — Новосибирск: Наука, 141, 1978.
87. Донченко В. А., Зуев В. Е., Тюльков Г. И. и др. Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 157, 1973.
88. Войцеховский А. В., Лиленко Ю. В., Антонов В. В. и др. Материалы IV Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, ч. 4. — Томск: ИОА СО АН СССР, 24, 1977.
89. Борзунов Н. Г., Медведев Ю. В., Петров А. С. ФТП, 10, 7, 1298, 1976.
90. Борзунов Н. Г., Строкан Н. Б. ФТП, 12, 4, 762, 1978.
91. Борзунов Н. Г., Строкан Н. Б., Тиснек Н. И. ФТП, 13, 2, 412, 1979.
92. Хлыстов А. С., Стельмашенко М. А., Елсуков А. Н. Труды I Межвузовской конференции по современной технике диэлектриков и полупроводников. Л., 397, 1957.
93. Хлыстов А. С., Котюков Ю. Н. Изв. вузов. Физика, 1, 83, 1958.

94. Котюков Ю. Н., Корогодов В. С. Изв. вузов. Физика, 4, 32, 1977.
95. Котюков Ю. Н., Бурнышева А. Н. В сб.: Ферриты — Минск: Изд-во АН БССР, 519, 1960.
96. Хлыстов А. С., Несмелов Н. С. Изв. вузов. Физика, 6, 98, 1965.
97. Мудров А. Е., Мещеряков В. А., Редькин Г. А. Изв. вузов. Физика, 4, 18, 1979; 9, 54, 1979.
98. Хлыстов А. С. В сб.: Ферриты. — Минск: Изд-во АН БССР, 530, 1960.
99. Хлыстов А. С., Жиляков С. М. Изв. вузов. Физика, 4, 46, 1965.
100. Жиляков С. М. Изв. вузов. Физика, 5, 21, 1967.
101. Жиляков С. М., Иволга В. В., Найден Е. П. Proc. ICM, 5, 254, 1973.
102. Жиляков С. М., Иволга В. В., Мальцев В. И., Найден Е. П. Письма в ЖЭТФ, **26**, 10, 74, 1977.
103. Жиляков С. М., Иволга В. В., Найден Е. П. ФТТ, **20**, 11, 3432, 1978.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

В. Н. ДЕТИНКО, В. С. СЕМЕНОВ

Одно из старейших направлений научной работы в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте представляют собой исследования по электромагнетизму, связанные с теорией и техникой электромагнитных методов контроля материалов и изделий. В предлагаемом очерке показано возникновение этого направления, сделан краткий обзор его научных результатов.

Конкретная работа началась с 1935 г. Руководство Кузнецкого металлургического комбината обратилось в СФТИ с предложением принять участие в разработке методики производственного контроля и отбраковки дефектных рельсов при их производстве на заводе. Предложение было принято, несмотря на довольно частную формулировку и чисто утилитарный характер задачи. Однако существенным было то, что задача эта относилась к действительно важной проблеме, которая, без сомнения, заслуживала самого серьезного внимания. Речь шла о дефектоскопии рельсов как крупномасштабной проблемы, от состояния которой зависела безаварийная работа железнодорожного транспорта страны. Бурное развитие хозяйства страны, резкое увеличение грузооборота в годы первых пятилеток, развернувшееся на транспорте стахановское движение, борьба за передовые методы труда на железных дорогах, отказ от устаревших технических норм — все это потребовало полной реорганизации всей работы, в том числе по части рельсовой дефектоскопии. Не было ни серьезной научной базы, ни системы надежных и вполне объективных критериев качества, ни соответствующих технических средств.

Работа с КМК, начатая тогда, длилась несколько лет, вплоть до Великой Отечественной войны, а в 1935 г. к ее выполнению была привлечена группа энтузиастов из числа студенческой молодежи (Э. С. Долбнев, Б. П. Кашкин, В. Ф. Ивлев, П. Н. Большаков, Н. М. Шилов и др.), руководил работами старший научный сотрудник отдела колебаний СФТИ доцент А. Б. Сапожников. В те годы для контроля стальных изделий широко применялся метод магнитной

дефектоскопии [1], в котором дефекты выявлялись с помощью намагничения изделий постоянным полем. Переменное же магнитное поле для этой цели почти не использовалось в связи с тем, что оно не проникало внутрь изделия и не способствовало обнаружению внутренних дефектов. Однако возбуждаемые переменным магнитным полем вихревые токи хорошо «замечают» дефекты, изнутри выходящие на поверхность или в самой поверхности изделия. Такие дефекты являются довольно распространенными и самыми опасными. Их «заметность» может быть существенно улучшена путем усиления слабых электрических колебаний, появившихся под влиянием дефекта, в то время как при использовании постоянного поля этого сделать практически нельзя. Следует добавить, что магнитная дефектоскопия использует искажения магнитного поля вследствие изменения магнитной индукции на месте дефекта, в силу чего она пригодна только для ферромагнитных тел. Дефектоскопия же с помощью вихревых токов, возбуждаемых переменным магнитным полем в проводниках, более универсальна, поскольку применима к любым проводящим телам.

Таким образом, к середине 30-х гг. вопрос о принципиальной возможности использования переменного магнитного поля для дефектоскопии проводящих, в том числе магнитных тел был достаточно ясен. Нужно было изучить электромагнитные процессы, лежащие в основе дефектоскопических методов, выяснить корреляцию электромагнитных полей с типами дефектов (в железнодорожных рельсах их насчитывается несколько десятков разновидностей), разработать методы дефектоскопии и создать сами дефектоскопы. Все это надолго определило научные интересы школы университетских магнитофизиков. Их исследования были направлены на разработку теории и техники электромагнитных методов контроля металлических изделий и заготовок путем намагничения гармоническими полями различной частоты, включая как частный случай постоянное магнитное поле. Это были задачи магнитостатики и магнитодинамики тел при воздействии однородного поля, а также задачи о намагничении полями локализованных источников, расположенных в различных средах с плоскими границами.

К решению этих задач были привлечены математики, которые практиковали только строгие математические методы. Для формулировки реальных задач, разрешимых в духе строгой математики, создавались приближенные к действительности математические модели из расчетных тел при простейших взаимных расположениях. Под дефектом при этом понимались заданные разрывы магнитных и электрических свойств тел (и сред), приводящие к нарушению регулярной картины магнитной индукции и прохождения в этих телах

вихревых токов. В практических случаях строгая трактовка редко могла быть последовательно доведена до конечного результата. Зато модельные представления, не будучи точными в смысле соответствия действительному положению вещей, благодаря строгости решения приоткрывали ясную и точную физическую картину электромагнитных процессов, позволяющую предвосхитить адекватный экспериментальный подход, построить соответствующую измерительную методику, и в любом сложном практическом случае, неподвластном математике, получить всю необходимую информацию эмпирическим путем. Такая фундаментальная исследовательская работа велась непрерывно все годы, продолжается она и по сей день. А тогда, в 30-е гг., работа стимулировалась насущными нуждами железнодорожного транспорта в современных прогрессивных методах контроля состояния путей и в рельсовой дефектоскопии.

Через год после начала работы с КМК были получены интересные экспериментальные результаты, свидетельствующие о перспективности использования метода переменных магнитных полей для дефектоскопии рельсов. Как оказалось, метод с большим удобством мог быть применен для проверки рельсов непосредственно на полотне железной дороги. Опыты, проведенные П. Н. Большаковым, показали, что при использовании для поиска дефектов переменного магнитного поля звуковой частоты не было необходимости в непрерывном касании искательного элемента рельса, как это требовалось при постоянном поле. Вихревые токи дефекта с помощью усилителя легко обнаруживались индуктивным искателем дистанционно, правда в непосредственной близости от рельса. Это обстоятельство оказалось весьма полезным для создания практических систем эффективных и надежных путевых дефектоскопов. Сама дефектоскопия рельсов на полотне железной дороги представлялась совершенно необходимой хотя бы потому, что наиболее значительная часть дефектов возникала в процессе эксплуатации рельсов и, следовательно, требовалась регулярная их проверка.

В 1936 г. была запущена маломощная экспериментальная установка на переменном токе звуковой частоты, которая обнаруживала визуально незаметные дефекты и трещины, выходящие на поверхность рельса. Работа с этой установкой дала первый опыт, который вскоре понадобился при создании первого путевого дефектоскопа. Так, было положено начало целой серии путевых дефектоскопов со знаменитой маркой СФТИ [2]. Была сформирована специальная комсомольская бригада (Б. П. Кашкин, П. Н. Большаков, В. Ф. Ивлев), которая под руководством А. Б. Сапожникова в короткий срок разработала первую дефектоскопическую путевую установку (тележку) на переменном токе. Испытание этой

тележки на линии Томской железной дороги прошло вполне успешно и подсказало ряд новых технических решений для создания более совершенной конструкции, так называемой модели № 4, которая представляла собой уже вполне законченный технический прибор, хорошо приспособленный к условиям железной дороги. Прибор этот был выполнен в 3 экземплярах и проверен на путях общей протяженностью более 1000 км. Было обнаружено множество дефектных рельсов, и тем самым показана целесообразность внедрения прибора на транспорт.

В 1937 г. была организована специальная лаборатория дефектоскопии, в задачу которой входила разработка проблем рельсовой дефектоскопии и создание дефектоскопов. К лету 1939 г. было изготовлено 9 опытных моделей дефектоскопов. Для популяризации дефектоскопа среди специалистов-путейцев, испытания дефектоскопов в эксплуатационных условиях, получения экспериментального материала и накопления опыта применения был задуман научно-технический поход с дефектоскопами по маршруту Томск—Москва. НКПС одобрил инициативу ученых и согласился финансировать поход. В походе участвовало 13 бригад, в состав которых входили сотрудники СФТИ и ТГУ, а также большая группа специально подготовленных работников пути. Вся трасса была распределена между бригадами, на долю каждой приходилось около 200 км пути. Поход был успешно завершен в месячный срок и дал богатейший научный материал [3]. Обобщение этого материала существенным образом продвинуло вперед рельсовую дефектоскопию, как таковую и способствовало созданию ее научных основ. Окончательная реализация результатов и выводов научно-технического похода на практике была закончена в последние военные годы: дефектоскопная тележка ДС-13 усилиями Б. П. Кашкина, Н. В. Мирошина, А. Б. Сапожникова была доведена до промышленного образца, сдана в серийное производство и поступила на вооружение железнодорожного транспорта в 1945 г.

Практика электромагнитной дефектоскопии не ограничивалась только контролем рельсов. Были предложены методы производственного контроля подшипниковых колец, определения мест обрыва и замыкания жил кабеля, проверки матриц и пуансонов для штамповки пластин статоров и якорей электромоторов, обнаружения межвитковых замыканий секций электрических машин [5]. Как правило, вслед за разработкой того или иного метода создавался соответствующий прибор — искатель мест обрыва и замыкания жил кабеля [6, 7], дефектоскоп для определения трещин в свинцовых оболочках кабелей, установка для выявления межвитковых за-

мыканий. Все они с успехом применялись на предприятиях для производственного контроля.

Из аппаратуры контроля, работающей на постоянном магнитном поле, следует отметить так называемый «магнитный карандаш», который представляет собой небольшой стержневой магнит с заостренными на клин полюсами [8]. На один полюс набирается «борода» из магнитного порошка — крокуса. Намагничивание контролируемого места изделия производится перемещением полюса с «бородой» по поверхности изделия. Кромки невидимых на глаз трещин, выходящих на поверхность, намагничиваясь, отрывают от полюса крупинки порошка и становятся видимыми. Такой простой дефектоскоп широко использовался практиками для дополнительного контроля ответственных деталей машин. В рельсовой дефектоскопии он оказался полезен для уточнения расположения такого опаснейшего дефекта, как открытая трещина усталости.

Из числа исследований, направленных на совершенствование измерительных и индикаторных устройств дефектоскопов на переменном магнитном поле, следует упомянуть работы по изучению автогенератора, катушка индуктивности которого содержит как объект исследования проводящий сердечник или находится вблизи поверхности исследуемого проводящего тела. Известна высокая чувствительность такого автогенератора к влияниям, вносимым отклонением электромагнитных параметров исследуемых объектов от нормы. Проведенные в СФТИ работы показали, что к использованию автогенераторных схем для контроля и обнаружения соответствия испытуемого объекта образцу нужно относиться с большой осторожностью. Выяснилось, например, что ленейные расчеты, которыми пользуются для оценок величины ухода частоты автогенератора, могут привести к грубым ошибкам. Для получения верных результатов должны быть учтены нелинейные эффекты, роль которых в ряде случаев оказывается решающей [9].

Высокая чувствительность рельсовых дефектоскопов имела свою оборотную сторону: наряду с действительно опасными дефектами фиксировалось большое число различных структурных неоднородностей (наклепов, выбоин, боксовин и т. п.), сигналы от которых создавали сильные помехи, скрывающие полезные (от дефектов) сигналы. Таким образом, появилась надобность в индикаторно-обнаруживательных схемах, способных на основе априорной информации о характере сигналов от дефектов выделять эти сигналы из массы помех [10].

Подробнее остановимся на теоретических работах по дефектоскопии переменным магнитным полем. Первым теоретическим исследованием явилась работа В. Н. Кессениха, ко-

торый построил интегродифференциальное уравнение для плотности вихревых токов в проводящем теле произвольной формы [4]. Определив из него плотность тока в любой точке тела и применив соответствующее интегрирование, можно получить выражения для внешних и внутренних полей целого тела, а также имеющего разрыв (дефект) в объеме и на поверхности. Сам автор получил конкретное решение в двух крайних случаях: дефект разделяет на две части весьма тонкую пластину и дефект представляет собой сквозную щель в бесконечно толстом бруске. В. И. Иванчикову удалось решить уравнение в задаче о бруске конечной ширины и толщины в однородном гармоническом поле, перпендикулярном боковым поверхностям бруска [11]. Н. М. Шилов применил уравнение В. Н. Кессениха для приближенного решения задачи о пластине в поперечном переменном поле путем замены интегрального уравнения системой алгебраических уравнений [12, 13]. Для более точного решения нужно было брать большое число уравнений, так что точность ограничивалась вычислительными возможностями, которые были тогда весьма скромными.

Продолжением аналитических исследований воздействия внешних постоянных и переменных полей на магнитные тела явились работы А. Б. Сапожникова, Б. П. Кашкина, В. И. Иванчикова, Н. В. Мирошина, Г. А. Бюллера и др. В результате этих работ к началу 50-х гг. были заложены теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел, которые в наиболее законченной форме были изложены в докторской диссертации А. Б. Сапожникова [14]. Значительную часть этих работ составляют расчеты намагничивания простейших тел в постоянном и переменном однородном поле. Объектами аналитического исследования и численного расчета были двухслойный круговой цилиндр в продольном поле, двухслойный шар в однородном поле, двухслойный круговой цилиндр в поперечном поле [15, 16]. Были решены задачи о поперечном намагничивании двухслойного эллиптического цилиндра постоянным однородным полем [17], об однородном намагничивании эллипсоида и многие другие задачи.

В большом числе случаев электромагнитного контроля первичное поле, в которое вносится испытуемое изделие, имеет локальный характер и никак не может считаться однородным. Простейшими идеализованными источниками локальных полей являются магнитные полюсы, диполи и токонесущие провода, из которых затем можно составлять витки и катушки, являющиеся основой для проходных и накладных преобразователей сигналов от дефектов. Первое исследование в этом направлении провел Б. П. Кашкин [18], рассмотревший аналитически и численно задачу о прямом проводе,

обтекаемом переменным током и расположенном над ферромагнитным полупространством. Аналитический расчет для двух токонесущих проводов и немагнитного полупространства проделал В. И. Иванчиков [19]. П. Н. Большаков проанализировал случай магнитного полупространства, намагничиваемого переменным полем длинной прямоугольной катушки [20]. Н. В. Мирошин провел расчет картины распределения вихревых токов, возбуждаемых в полупространстве полем сосредоточенного источника [21]. Крупным недостатком рассмотрения указанных задач является то, что решения получаются в неэффективной и физически мало наглядной форме, требующей больших вычислений. В связи с этим и здесь определенный интерес представляют моменты реальной обстановки, использование которых упрощает расчетную сторону дела. Благоприятную возможность в этом смысле представляет слабая выраженность магнитных свойств исследуемых объектов. С учетом этого обстоятельства В. С. Семеновым были получены решения целого ряда задач, в которых однородное полупространство намагничивается сосредоточенными источниками различных типов [22, 23].

Вопросы, связанные с намагничиванием тел, решаются в классической электродинамике почти исключительно в линейном приближении, то есть в предположении, что магнитная индукция всегда пропорциональна намагничивающему полю. Реальные задачи дефектоскопии настоятельно требуют учета нелинейного характера зависимости индукции от поля. В исследованиях школы СФТИ вопросу учета нелинейности всегда уделялось большое внимание. В частности, удалось рассмотреть задачу о поле доведенного до насыщения полупространства со скрытой полостью-дефектом в форме эллиптического цилиндра. Удалось также, используя метод последовательных приближений, провести расчет поля около круглого цилиндрического дефекта в неограниченной среде [24]. Значительное внимание всегда уделялось вопросам учета нелинейности в условиях намагничивания переменным полем. Здесь прежде всего нужно отметить один интересный нелинейный эффект, открытый в 1956 г. Н. В. Мирошиным. Эффект состоит в том, что скрытый в ферромагнитном теле дефект, не выявляющийся при намагничивании последнего слабым переменным полем из-за сильно выраженного скин-эффекта и незначительной величины поля, начинает четко обнаруживаться индукционными датчиками, если дополнительно наложить на тело достаточно сильное постоянное поле. Описанное явление получило качественное и частично количественное истолкование в работе [25]. К числу работ последнего времени относятся аналитические и экспериментальные исследования магнитостатических полей рассеяния поверхностных дефектов с учетом

влияния на поле дефекта нелинейности кривой намагничивания [27].

Видное место в работах занимают исследования электромагнитных процессов, происходящих в проводящих телах, движущихся в постоянном магнитном поле. Эти исследования связаны с вопросами скоростного контроля, в частности с новыми повышенными требованиями к скорости проверки рельсов в пути. Начало этих работ относится к 1945 г. Они проводились в плане как теоретических, так и экспериментальных исследований. В направлении построения теории А. Б. Сапожниковым и Т. М. Сычевой были получены аналитические выражения для плотности вихревых токов в бесконечно длинных тонкостенных немагнитных трубках круглого и прямоугольного сечения, движущихся с заданной скоростью в поле точечных и линейных полюсов и диполей [28]. Часть этих выражений численно проанализирована и найден характер зависимости картины распределения токов и их магнитных полей от скорости движения. Сравнительно недавно получено полное решение задачи определения магнитного поля в плите, движущейся с постоянной скоростью в переменном плоском поле [29]. Б. Ф. Кононковым проведены экспериментальные исследования железных и алюминиевых кольцевых образцов квадратного сечения, вращающихся в постоянном магнитном поле сосредоточенных источников [30]. Впервые проведено опытное исследование картины распределения магнитного потока по площади сечения движущегося в магнитном поле проводящего объекта. При обработке материалов, полученных в группе исследований электромагнитных процессов в движущихся телах, было впервые установлено, что значительное влияние на процессы намагничивания рельса в условиях скоростного контроля оказывают остаточные явления в ферромагнетике, в первую очередь гистерезис.

Приведенный краткий обзор показывает, что старейшая на востоке страны школа магнитофизиков университета и СФТИ имеет большие заслуги в становлении и развитии электромагнитной дефектоскопии как отрасли науки и является инициатором внедрения передовых методов дефектоскопии на транспорте и в промышленности.

Остановимся еще на некоторых моментах, связанных с работами по неразрушающим методам контроля изделий из полупроводящих и диэлектрических материалов и структуроскопии самих материалов. Прежде всего следует отметить полную непригодность методов, основанных на использовании статических и квазистатических полей для целей контроля и структуроскопии полупроводящих и непроводящих материалов, изделий и заготовок из них. Для разработки эффективных методов контроля необходимо применять

высокочастотные и сверхвысокочастотные поля, позволяющие на основе «электрической» составляющей электромагнитных явлений делать заключения об отклонениях от нормы в структуре и качестве. В связи с этим был поставлен ряд задач, в которых источниками первичного поля являлись излучающие вертикальные и горизонтальные электрические и магнитные диполи [31, 32]. Аналитические и экспериментальные исследования в этом направлении были проведены в широком диапазоне частот, значений диэлектрических проницаемостей и проводимостей. Была решена, в частности, задача о влиянии плоскослоистой среды на импеданс горизонтальных линейных антенн в качестве первичных преобразователей поля. Численные результаты расчетов позволили выяснить зависимость входного сопротивления горизонтальной антенны от электрофизических параметров диэлектриков. На основе результатов расчетов и экспериментов разработаны способы бесконтактного измерения диэлектрической проницаемости и влажности ряда сыпучих и строительных материалов. На основе использования особенностей распространения вертикально поляризованной СВЧ волны вдоль поверхности раздела двух сред разработана методика и создан прибор для измерения плотности снежного покрова и льда, который применяется на ряде гидрометеорологических и гляциологических станций Союза.

К этой же группе работ относятся исследования, направленные на разработку неразрушающих методов контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов. В этих исследованиях, проводимых под руководством А. С. Петрова и Ю. В. Медведева, используется явление взаимодействия локального СВЧ электрического поля со свободными носителями тока в полупроводниковых материалах. Измерение потерь, вносимых полупроводниковым образцом в локальное поле СВЧ резонатора квазистатического типа, позволяет определять основные электрофизические параметры (удельное сопротивление, подвижность и время жизни носителей тока) с высоким пространственным разрешением в образцах произвольной формы (пластины, слитки, стержни, двухслойные структуры) [33—36]. В отличие от традиционных зондовых методов измерения параметров полупроводников на постоянном токе, разработанные СВЧ датчики обеспечивают возможность измерения сверхчистых полупроводниковых материалов, имеющих высокое удельное сопротивление, не требуют изготовления контактов, обладают хорошей воспроизводимостью, дают возможность определять параметры с пространственным разрешением до 100 мкм. Последнее свойство позволяет использовать разработанный метод не только для отбора нужного материала, но, контро-

лируя его на стадии выращивания монокристаллов, технологически обеспечивать высокую однородность.

Подводя краткий итог деятельности ученых СФТИ и ТГУ в области электромагнетизма и электромагнитных методов контроля, подчеркнем одно важное обстоятельство — вся история развития этого научного направления характеризуется сочетанием фундаментальности в постановке и глубине разработки проблем с практической целенаправленностью работ, тесной связью с нуждами народного хозяйства страны, интересами промышленности Сибири, производством. Все научные проблемы исходили из потребностей практики, опирались на практику, а научные результаты находили свое применение на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. М., 1934.
2. Сапожников А. Б. Описание путевых дефектоскопов СФТИ. Томск, 1941.
3. Шилов Н. М. Труды СФТИ, 7, 34, 1945.
4. Кессених В. Н. ЖТФ, 532, 8, 1938.
5. Материалы совещания по применению электромагнитных методов контроля. — Труды СФТИ, 29, 1949.
6. Кашкин Б. П. Труды СФТИ, 29, 43, 1949.
7. Кашкин Б. П. Труды СФТИ, 29, 51, 1949.
8. Мирошин Н. В. Магнитный карандаш. Авторское свидетельство 105814.
9. Сапожников А. Б., Семенов В. С. Сб. докладов научно-технической конференции к Дню радио. Томск, 1964.
10. Овчинников А. В., Семенов В. С. Труды СФТИ, 52, 194, 1970.
11. Иванчиков В. И. Вихревые токи и их магнитное поле у дефекта. Канд. дис. Томск, 1951.
12. Шилов Н. М. ЖТФ, 7, 624, 1939.
13. Шилов Н. М. ЖТФ, 9, 695, 1940.
14. Сапожников А. Б. Основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. Докт. дис. Томск, 1951.
15. Бюллер Г. А. Труды СФТИ, 26, 213, 1948.
16. Антипов Б. А. Труды СФТИ, 26, 147, 1948.
17. Сапожников А. Б. Труды СФТИ, 26, 1948.
18. Кашкин Б. П. Труды СФТИ, 30, 115, 1970.
19. Иванчиков В. И. Труды СФТИ, 30, 53, 1950.
20. Большаков П. Н. Труды СФТИ, 30, 155, 1950.
21. Мирошин Н. В. Труды СФТИ, 26, 238, 1948.
22. Семенов В. С. Изв. вузов. Физика, 102, 2, 1961.
23. Семенов В. С. Изв. вузов. Физика, 3, 134, 1961.
24. Семенов В. С. Труды СФТИ, 52, 48, 1970.
25. Семенов В. С. Труды СФТИ, 52, 59, 1970.
26. Мирошин Н. В. Изв. вузов. Физика, 4, 139, 1960.
27. Новикова И. А., Мирошин Н. В. Дефектоскопия. 4, 95, 1973.
28. Сычева Т. М. Вихревые токи в движущихся телах. Канд. дис. Томск, 1951.
29. Бюллер Г. А. Дефектоскопия, 3, 1972.
30. Кононков Б. Ф. Изв. вузов. Физика, 4, 48, 1958.

31. Радугин О. К., Фрумкис Л. С., Семенов В. С. Труды СФТИ, 52, 64, 1970.
32. Радугин О. К., Фрумкис Л. С., Семенов В. С. Труды СФТИ, 52, 73, 1970.
33. Данилов Г. Н., Медведев Ю. В., Петров А. С. ПТЭ, 3, 224, 1973.
34. Ахманаев В. Б., Медведев Ю. В., Петров А. С. ПТЭ, 5, 257, 1975.
35. Ахманаев В. Б., Медведев Ю. В., Данилов Г. Н., Лисюк Ю. В. Изв. вузов. Физика, 6, 11, 1976.
36. Медведев Ю. В., Петров А. С. — В сб.: Контроль качества полупроводниковых материалов. М., 4, 173, 1976.

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

М. С. БОБРОВНИКОВ, А. Г. ДМИТРЕНКО

§ 1. Введение

Радиофизические исследования в Томском государственном университете имеют более чем полувековую историю*. Первые организационные шаги в этом направлении были сделаны в 1923 г., когда физико-математический факультет по инициативе профессора В. Д. Кузнецова открыл специализацию «электромагнитные колебания». Вскоре в университете были оборудованы радиолаборатория и опытная коротковолновая станция, созданная по договору с Нижегородской лабораторией имени В. И. Ленина. В 1928 г. в Томске при ТГУ создается Сибирский физико-технический институт, радиофизические исследования в основном переносятся в отдел колебаний, общее руководство которым осуществляет В. Н. Кессених.

Первые радиофизические исследования представляли собой изучение прохождения электромагнитных волн вдоль различных трасс путем измерения напряженности поля радиостанций. Однако уже в начале 30-х гг. круг интересов томских радиофизиков расширяется: под руководством В. Н. Кессениха начинается широкая подготовка к исследованию ионосферных процессов путем импульсного зондирования. 19 июня 1936 г., в день полного солнечного затмения, начала регулярные наблюдения первая в Советском Союзе ионосферная станция.

50-е гг. характеризуются дальнейшим расширением и углублением радиофизических исследований. В 1952 г. на физическом факультете ТГУ по инициативе доцента Б. П. Кашкина и профессора А. Б. Сапожникова создается кафедра радиофизики, а в 1953 г.— открывается радиофизический факультет, первым деканом которого был профессор В. Н. Кессених. Выпускники кафедры радиофизики и радиофизического факультета сыграли ведущую роль в создании и развитии новых радиофизических направлений. С 1955 г.

*) В конце XIX века всего через год после изобретения радио профессор ТГУ Ф. Я. Капустин пытался использовать приемник А. С. Попова в экспедиции по наблюдению полного солнечного затмения в устье Енисея.

под руководством В. А. Филоненко начинает развиваться направление, связанное с явлением дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн. Другое новое направление — теория дифракции электромагнитных волн и электродинамика линий передачи и излучающих систем — начинает развиваться с 1955—1957 гг. под руководством В. Н. Кессениха и М. С. Бобровникова. Создание и развитие указанных радиофизических направлений всегда встречало внимание и поддержку со стороны дирекции СФТИ (В. Д. Кузнецов, М. А. Кривов, В. А. Филоненко и др.).

Ниже представлен обзор основных результатов исследований по направлениям, получившим наибольшее развитие в Томском университете, из которых, как следует из предыдущего изложения, естественно выделяется три: 1) исследования по распространению радиоволн; 2) ионосферные исследования; 3) исследования по дифракции волн и антеннам.

Следует отметить, что данный обзор не претендует на полноту, так как не охватывает всех исследований по радиофизике, проведенных в Томском университете.

§ 2. Исследования по распространению радиоволн

Исторически первыми исследованиями по распространению радиоволн явились работы по изучению напряженности поля радиостанций с целью организации радиосвязи.

В начале 1925 г. директор Нижегородской радиолаборатории профессор М. А. Бонч-Бруевич обратился к ректору Томского университета с предложением включиться в работу по изучению прохождения коротких радиоволн на трассе Нижний Новгород—Томск, которое было принято. Эти исследования были успешно проведены с помощью опытной коротковолновой радиостанции университета (ТУК), руководство которой со стороны Нижегородской радиолаборатории осуществлял профессор В. В. Татаринов.

Вслед за этой работой последовал целый цикл работ аналогичного профиля. Это работы 1929 г. по установлению коротковолновой связи между движущимися судовыми и неподвижными береговыми радиостанциями на реке Енисей, работы 1931 г. по измерению напряженности поля радиостанций на различных трассах, работы 1935 г. по организации связи между Томском и движущимися судами, находящимися на реках Томь и Обь между Томском и Барнаулом. В этих работах принимали участие А. Б. Сапожников, А. А. Холодковский, Б. Н. Путков, А. С. Балакшин, В. Г. Денисов, В. А. Тюнин.

В период с 1936 по 1954 г. систематических исследований по распространению радиоволн в Томском университете не

проводилось, а сформировавшийся в период проведения вышеуказанных работ коллектив был занят решением значительно более трудной по тем временам задачи — организации импульсного зондирования ионосферы с целью прогнозирования критических частот радиосвязи.

Новый качественный этап в развитии исследований по распространению радиоволн начался с 1955 г. работами по исследованию открытого в начале 50-х гг. явления дальнего тропосферного распространения ультракоротких радиоволн (ДТР УКВ). Ученые СФТИ под руководством В. А. Филоненко одними из первых (аналогичные исследования для европейской климатической зоны параллельно проводились под руководством института радиотехники и электроники АН СССР) начали изучение этого явления. Носившие первоначально экспериментальный характер, эти исследования со временем сложились во вполне законченное направление, изучающее указанное явление комплексно — с учетом характеристик тропосферы, подстилающей земной поверхности, а также приемных и передающих антенн.

Первые работы по ДТР УКВ были посвящены изучению амплитудной структуры поля — среднего уровня и статистических характеристик амплитуды поля при пространственном, временном и угловом разнесенных приемах. Особое внимание было уделено разработке методики экспериментальных исследований, точности измерений и исследованию зависимости структуры поля от метеорологических параметров тропосферы [1—6].

С начала 60-х гг. начинаются многоплановые исследования ДТР УКВ. Основное внимание было направлено на изучение влияния условий распространения радиоволн на искажения характеристик антенных систем и влияния антенн с конечными раскрывами на статистические характеристики принимаемых сигналов при различных видах разноса. В результате экспериментальных исследований диаграмм направленности антенн с раскрывами от 20 до 100 длин волн изучены статистические характеристики степени расширения главного лепестка, флуктуаций положения максимума и центра тяжести диаграмм направленности для сухопутных и морских трасс средней протяженности в различное время года [7—10]. Анализ этих результатов показал, что на сухопутных трассах, а в осенне-зимний период и на морских трассах расширение диаграмм направленности антенн с раскрывом 100 длин волн достигает в 60% случаев 200—300%, а интенсивность флуктуаций положения максимума и центра тяжести диаграмм направленности составляет величины порядка 0,4 и 0,2°. Было также установлено, что степень расширения диаграмм направленности монотонно уменьшается с уменьшением раскрыва антенны, а интенсивность

флуктуаций положения максимума увеличивается до величины порядка 0,8—1,0°. Это объясняется искажением функции распределения поля по раскрыву антенны, обусловленным многолучевостью приходящего сигнала.

Наряду с изучением пространственной структуры поля ДТР УКВ большое внимание уделялось изучению частотно-временных свойств тропосферного канала связи, описываемого как некоторый эквивалентный линейный четырехполюсник. Эти исследования проводились путем зондирования тропосферного канала ультракоротким импульсом длительностью 50 нс. Впервые в Советском Союзе были получены статистические характеристики импульсного отклика, давшие возможность непосредственно получить многолучевую структуру загоризонтного тропосферного канала связи [9—11]. Это такие характеристики, как средняя энергетическая импульсная реакция тропосферного канала, законы распределения флуктуаций сигналов в лучах, взаимокорреляционные свойства сигналов в лучах и другие. На основании этих исследований показана эффективность использования разнесенного приема по задержкам [12]. Экспериментальные результаты по зондированию тропосферного канала импульсом короткой длительности позволили разработать методику восстановления мгновенной передаточной функции канала и ее характеристик, знание которых дало возможность оценить степень искажений тонкой структуры как простых, так и сложных сигналов, используемых в системах связи и радиолокации [13, 14].

В комплекс исследований явления ДТР УКВ вошли также измерения высотной зависимости сигналов и вопросы дистанционного радиозондирования тропосферы с целью измерения скорости ветра на различных высотах радиотехническим способом. Эти исследования, проведенные одновременно с измерениями скорости ветра с помощью шаров-зондов, показали, что метод определения скорости ветра радиотехническим способом дает весьма удовлетворительные результаты [15].

Большой экспериментальный материал по исследованию ДТР УКВ позволил перейти и к теоретическим обобщениям.

В 1968—1970 гг. рассматривались вопросы излучения элементарных источников, помещенных в турбулентные объемы. Были решены интегральные уравнения Дайсона для средних функций Грина плоского турбулентного слоя, случайно неоднородных цилиндра и шара в приближении Бурре, получено выражение для эффективной диэлектрической проницаемости этих объемов и указано на возможность обобщения этих результатов на случай тел произвольной формы [16—18].

В 1970—1979 гг. проведен большой цикл работ по исследованию рассеяния скалярных и электромагнитных волн на турбулентных неоднородностях тропосферы, по изучению распространения волн в приземных волноводах, а также по рассеянию на случайно неровных поверхностях. Для турбулентных неоднородностей тропосферы, энергетический спектр которых соответствует закону «двух третей» Колмогорова-Обухова, получены в борновском приближении выражения для функции ослабления, средней интенсивности, корреляционной функции при пространственном разносе приемных пунктов; для энергетического спектра задержек тропосферного канала связи, основанного на рассеянии волн в турбулентном объеме, изучена зависимость этих характеристик от направленных свойств приемной и передающей антенн как при рассеянии на мелкомасштабных неоднородностях тропосферы, так и в том случае, когда неоднородности имеют сложный характер и отличаются большой горизонтальной протяженностью [19—22]. Распространение радиоволн в условиях сверхрефракции в приземном слое тропосферы рассматривалось на основе билинейной модели тропосферы; численное решение характеристического уравнения для нормальных волн приземного волноводного слоя для широкого интервала значений его параметров позволило получить достаточно полное представление о свойствах слабозатухающих «захваченных» волн, рассмотреть вопросы эффективности их возбуждения, зависимость от ряда параметров их фазовых и групповых скоростей, а также процесс переноса направленного импульсного излучения [23, 24]. Эти исследования можно рассматривать как развитие проведенных в 1955—1960 гг. работ по отражению и рефракции радиоволн в слоистой тропосфере [25, 26].

Вопросы рассеяния волн на случайно неровных поверхностях рассматривались в геометрооптическом приближении, сформулированном на основе строгих интегральных уравнений для поля. Построена единая стандартная методика описания многократных переотражений и затенений, показано, что модифицированный метод Кирхгофа, использованный ранее для описания рассеяния волн на случайных поверхностях с крупномасштабными неровностями, является первым приближением геометрооптического метода, основанного на интегральных уравнениях. Получены расчетные результаты для интенсивности рассеянного поля с учетом переотражений второго порядка, которые в ряде случаев вносят заметный вклад в поле при скользящем падении волн, дано обобщение этих результатов с учетом векторного характера поля [27—30].

Модифицированный метод Кирхгофа, использовавшийся в работах [27—30], и процедура учета затенений были при-

менены при исследовании отражения радиоволн от неровной границы диэлектрического полупространства [31—32], показатель преломления которого близок к единице. Расчет элементов корреляционной матрицы позволил изучить поляризационную структуру рассеянного поля при падении на неровную границу вертикально поляризованной волны, возбуждаемой электрическим диполем. Отмечен относительно высокий уровень кроссполяризованных компонент поля в окрестности угла Брюстера и сглаживание минимума основной компоненты.

Работы по рассеянию волн на неровной поверхности получили дальнейшее развитие при рассмотрении свойств поля УКВ в условиях города, когда излучатель и приемник находятся ниже уровня крыш окружающих зданий. Статистическое описание многократных переотражений и затенений в этих условиях позволило изучить характер ослабления поля УКВ в городе, структуру его многолучевости, оценить роль эффектов дифракции и волноводного распространения радиоволн вдоль радиальных по отношению к источнику улиц [33—35].

§ 3. Исследования ионосферы

Предпосылки для перехода к исследованию ионосферы были созданы проводимыми в начале 30-х гг. работами по измерению напряженности полей коротковолновых радиостанций на различных трассах. В процессе этих исследований под руководством В. Н. Кессениха сформировался коллектив ученых и была создана аппаратура, которая при дальнейшем усовершенствовании использовалась для импульсного зондирования ионосферы. В частности, был предложен и реализован панорамный метод зондирования [36], позволивший ускорить регистрацию ионосферных явлений.

Зная о наличии в СФТИ определенной научной базы, член-кор. АН СССР М. А. Бонч-Бруевич по поручению Академии наук в начале 1935 г. обратился к дирекции СФТИ с предложением включиться в программу исследований за поведением ионосферы в период полного солнечного затмения 19 июня 1936 г., полоса которого проходила через Томск. Это событие в значительной степени стимулировало развитие ионосферных исследований в Томске.

В результате наблюдений 18—20 июня 1936 г., ознаменовавших начало регулярных наблюдений за ионосферой в окрестностях Томска, было доказано, что основная роль в ионизации атмосферы принадлежит фотонному излучению Солнца [37—38]. С установлением этого факта начались широкие исследования влияния солнечной активности на параметры ионосферы.

Вдохновитель и организатор ионосферных исследований В. Н. Кессених с первых лет работы поставил ряд задач [39], над выполнением которых трудились ученые ионосферной станции. В частности, под его руководством или непосредственном участии были проведены расчеты эквивалентного и оптического пути луча в ионосфере [40], предложена методика расчета оптимальных волн по данным ионосферной станции [41], рассмотрены вопросы отражения радиоволн от ионосферы [42], исследована дисперсия и абсорбция электромагнитных волн в ионосфере [43], изучено географическое распределение электронной концентрации слоя F_2 [44] приведена классификация типов высотночастотных характеристик ионосферы [45]. В процессе этих исследований впервые был открыт слой «Ж» ионосферы [46].

В военные годы, несмотря на то, что большинство сотрудников было призвано в Красную Армию, ионосферная станция под руководством Н. А. Кориневской продолжала свою работу. Исследования за военные годы дополнили ряд наблюдений по влиянию солнечной активности на состояние ионизации. В частности, была обнаружена третья компонента магнитоионного расщепления [47].

В послевоенные годы под руководством А. И. Лихачева продолжались исследования связи состояния ионизации ионосферы с солнечной активностью. Исследовался суточный и годовой ход критических частот [48, 49], особенности его вариаций, а также такие аномальные провления ионизации атмосферы, как вечерний максимум ионизации слоя F_2 [48], утренний минимум ионизации [49] и ряд других. Наряду с выявлением циклических закономерностей обнаружено, что некоторые параметры, например градиент электронной концентрации в нижней части слоя F_2, размах вечернего максимума ионизации, не зависят от индекса солнечной активности [50, 51]. С целью объяснения этого явления было высказано предположение о существенной роли в ионизации атмосферы ее ионно-молекулярного состава.

Результаты проводимых работ систематически обобщались с целью выработки общих взглядов на строение ионосферы и поиска новых путей ее исследования [52—55]. В частности, в работе [55] впервые изложены основные идеи по использованию некогерентного рассеяния для изучения параметров ионосферы. К настоящему времени этот метод получил широкое распространение.

Исследование солнечно-земных связей было продолжено в ходе выполнения международных геофизических программ, в которых СФТИ участвует с 1957 г. Это такие программы, как МГГ (международный геофизический год), МГС (международный год сотрудничества), МГСС (международный

год спокойного Солнца), МГАС (международный год активного Солнца), МИМ (международные исследования магнитосферы). Изучено изменение основных параметров ионосферы в зависимости от зенитного угла Солнца [56, 57] и солнечной активности [58], в результате чего обнаружены такие явления, как ограничение роста критических частот слоя Φ_2 при высокой солнечной активности [59] и устойчивости вариаций параметров и характеристик ионизации ионосферы [60, 61].

В последние годы особенно большое внимание уделялось изучению циклических приращений критических частот, а также возмущенности критических частот ионосферы. Исследованы особенности временного и широтного распределения циклических приращений [62], выявлены их корреляционные соотношения в суточном ходе. На основе изучения циклических приращений для средних широт предложен способ прогноза критических частот слоя Φ_2.

При изучении возмущенности критических частот ионосферы исследовались ее статистические закономерности, позволившие выявить суточный ход возмущенности для различных сезонов года [62], определить зависимость возмущенности при ее росте и спаде от величины электронной плотности. Показано, что такие характеристики, как фаза максимума суточной возмущенности, интенсивность роста возмущенности, не зависят от солнечной активности и изменения электронной концентрации [63]. Эти особенности поведения возмущенности позволяют надеяться на возможность создания способа краткосрочного прогноза без прямого привлечения солнечных данных.

Одним из важнейших аспектов проблемы солнечно-земных связей является выявление взаимосвязи вариаций магнитного поля Земли с ионосферными процессами. Исследования этой взаимосвязи были начаты в 1958 г. с помощью специально созданной по инициативе профессора В. Н. Кессениха магнитной станции [64]. Результаты измерений вариаций магнитного поля Земли, полученные на этой станции, сравнивались с ионосферной обстановкой и солнечной активностью. На основании большого цикла измерений установлен ряд закономерностей, связывающих суточные вариации магнитного поля Земли с зенитным углом Солнца и уровнем солнечной активности [65—68].

К началу 70-х гг. эти исследования приобретают четко выраженную практическую направленность — прогноз состояния ионосферы. Для решения этой задачи были исследованы высотное распределение электронной концентрации, ее временное и пространственное изменение [69], а также связь между возмущениями магнитного поля в период суббурь

и поведением ионосферы [70]. Экспериментально удалось установить, что возмущения в ионосфере в период суббурь запаздывают по сравнению с возмущением в магнитном поле Земли. Эта особенность поведения ионосферы создала предпосылки для построения эмпирической модели поведения электронной концентрации в слое F_2 во время суббури. На основании анализа ионосферных характеристик (высоты максимума, электронной концентрации в максимуме слоя F_2, максимально применимых частот) удалось получить пространственное распределение указанных параметров в средних широтах, и такая модель была построена [71]. (Экспериментальная проверка предложенной модели показала, что надежность прогноза составляет 92% на широте г. Томска).

Наряду с исследованием протекающих в ионосфере глобальных процессов большое внимание было уделено изучению протяженных и мелкомасштабных неоднородностей и их использованию для целей КВ и УКВ связи. Исследованы параметры протяженных неоднородностей [72—73], их изменение с высотой [74], определен энергетический спектр функций корреляции в присутствии случайных и регулярных движений [75], а также связь этих движений с геофизическими явлениями, в частности с состоянием магнитного поля Земли [75]. Большое значение для исследования неоднородностей имело создание специальной высокочастотной аппаратуры [76—79], с помощью которой, в частности, исследованы малые смещения частоты КВ сигнала во время солнечного затмения 29 апреля 1976 г. [80].

При изучении мелкомасштабных неоднородностей большое внимание было уделено рассмотрению возмущений, вызываемых гиперзвуковым движением в ионосфере твердых тел малых размеров. Это рассмотрение стало возможным благодаря специально предложенному для этой цели численному методу решения уравнения Больцмана, основанному на введении функции точечного источника [81]. С помощью предложенного метода исследованы возмущения концентрации и температуры нейтральной компоненты ионосферной плазмы при обтекании сферического тела [81—82], возмущения концентрации заряженной компоненты, возникающие в результате взаимодействия ионов с поверхностью обтекаемого тела [83].

Вопросы, связанные с использованием рассеяния на ионосферных неоднородностях для целей КВ и УКВ связи, начали рассматриваться в СФТИ с 1958 г. Были исследованы закономерности рассеяния КВ в слое F_2, суточные и сезонные изменения медианных уровней сигнала, статистические характеристики метеорной составляющей сигнала, поляризационные характеристики, фазовые характеристики канала ионосферного рассеяния, полоса частот, передаваемых без

искажения [84—85]. Эти работы проведены с помощью специально сконструированной аппаратуры для анализа случайных процессов [86—88]. В последние годы проведен большой цикл экспериментальных работ, посвященных исследованию закономерностей распространения коротких радиоволн на среднеширотных трассах различной ориентации в переходное время суток (восход и заход Солнца) [89—92], а также теоретических работ по изучению влияния шумовых инфразвуковых волн на спектр коротких радиоволн при ионосферном распространении [93, 94]. Получены уникальные данные по фокусировке радиоволн на краю «мертвой зоны», которые позволяют оперативно определять такой слабоизученный параметр ионосферы, как ее наклон [89—92].

К началу 70-х гг. был накоплен огромный массив экспериментальных данных, полученных как наземными радиофизическими методами, так и с помощью космических аппаратов, на основе которого в основном была построена морфология ионосферы, а в целом ряде случаев поняты физические процессы, протекающие в верхних слоях атмосферы. Все это, а также развитие физики плазмы и вычислительной техники позволили перейти к качественно новому этапу в исследовании ионосферы — ее математическому моделированию. Принципиальным отличием развиваемых в СФТИ моделей ионосферы является учет взаимосвязи между заряженными и нейтральными частицами путем решения совместной системы уравнений магнитной гидродинамики. Первый вариант такой модели представлен в работе [95]. Эта модель включала только долгопериодические изменения в одномерной постановке. В рамках этой модели удалось показать роль отдельных механизмов в сезонной перестройке ионосферы, в частности роль атомного кислорода в непонятных ранее полугодовых изменениях параметров плазмы [96, 97].

Следующий шаг в развитии моделей ионосферы связан с созданием нестационарной самосогласованной одномерной модели, в которой пересмотрены схемы нагревания электронов и нейтральных частиц солнечным ультрафиолетовым излучением [98, 99]. Эта модель позволила выявить основные каналы нагревания компонент ионосферной плазмы и исследовать их относительную эффективность. Показано, что эффективность нагревания нейтрального газа излучением Солнца с длиной волны, меньшей 1026 ангстрем, составляет 0,15—0,35% от поглощаемой энергии. При исследовании нагревания ионосферы излучением в континууме Шумана-Рунге установлено, что тепловые электроны ионосферной плазмы могут нагреваться не только через фотоэлектроны, что было общепринятым, но и этим излучением через возбуждение кислорода. Этот источник может состав-

лять до 50% от общего нагрева электронов на высотах до 170 км. При этом принципиальным был вопрос о характере распределения азота по колебательным уровням. В работах [100, 101] показано, что распределение азота по колебательным уровням является больцмановским, за исключением высот, меньших 150 км, где отклонение от равновесного распределения может иметь место. Здесь же вычислена колебательная температура азота, которая оказалась существенно отличной от кинетических температур плазменных компонент.

Последующее развитие работ по моделированию ионосферы связано с расширением интервала высот до 80—500 км и переходом к трехмерным нестационарным задачам. В связи с этим в [102] исследован эффект влияния турбулентного перемешивания кислородных составляющих в нижней термосфере. В результате показано, что одной из основных причин сезонных изменений нейтрального состава основания термосферы является турбулентная диффузия. В работах [103, 104] развивается постановка задачи и ее численная реализация на основе метода расщепления в трехмерном приближении. Решение этой задачи позволит наряду со среднеширотной включить в рассмотрение полярную и экваториальную области ионосферы.

§ 4. Исследования по дифракции радиоволн

В 30-е гг. В. Н. Кессених провел первые в ТГУ исследования по электродинамике излучающих систем [105, 106], он осуществил оригинальный и строгий аналитический подход к определению волнового сопротивления длинной однопроводной линии [107].

Исследования по дифракции радиоволн были начаты в 1955 г. и представляли собой в основном электродинамическое рассмотрение линий передачи. В качестве линии передачи выбирался бесконечно длинный цилиндрический проводник, в общем случае покрытый диэлектрической оболочкой. Изучены вопросы связанные с возбуждением такого проводника [108—115], передачей мощности по нему [116, 117]. В частности, найдены предельные значения передаваемых мощностей [116, 117], рассмотрены типы волн, распространяющихся вдоль провода [112], определена эффективность возбуждения поверхностных волн в нем [113].

В последующие годы рассматриваемый класс задач расширяется. Исследуются линии передачи с неоднородностями типа скачка импеданса и разветвления, а также более сложные линии передачи — периодические и анизотропные. Были рассмотрены вопросы дифракции электромагнитных волн на

ступеньке поверхностного импеданса в круглом волноводе [118], коаксиальном волноводе [119, 120], вопросы дифракции волн в системе, состоящей из полубесконечного импедансного цилиндра и импедансной полуплоскости, ортогональной этому цилиндру [121—123], вопросы передачи энергии по линиям с разветвлениями [124—126]. Исследованы типы волн, распространяющихся в гребенчатых структурах [127—132], связанных спиральных линиях [133] и системах проводов с диэлектрическим покрытием [134]. На основании этих исследований, в частности, обнаружено, что можно обеспечить хороший коэффициент передачи через разветвления путем установки в одной из линий отражающего экрана, удаленного от разветвления на нечетное число четвертей длин поверхностных волн. Этот эффект позволил создать оригинальное устройство для поворота электромагнитной энергии с минимальными потерями [135]. Изучение электродинамических свойств металлической гребенчатой структуры позволило разработать широкополосный фазовращатель на круглом волноводе [136, 137].

В 1956—1962 гг. был также выполнен ряд исследований, не связанных непосредственно с рассмотрением электромагнитных процессов в линиях передачи. Это работы по отражению плоской электромагнитной волны от периодической структуры из проводящих пластин [138], по определению диэлектрической проницаемости искусственных диэлектриков [139, 140], по формулировке приближенных граничных условий [141], по расчету входного сопротивления вертикального вибратора, расположенного над поверхностью Земли [142, 143], по исследованию эффективности возбуждения импедансных поверхностей источниками различного типа [144—147].

Начало 60-х гг. знаменует существенный качественный скачок в развитии теории дифракции в СФТИ — с этого времени начинается систематическое изучение проблемы дифракции волн в клиновидных областях. Эта проблема занимает особое место в силу того, что клин является удобной математической моделью большого числа физических задач, встречающихся в электродинамике, акустике, геофизике, газодинамике и гидродинамике. Хотя этой проблемой занимались многие исследователи, томские ученые внесли существенный вклад в ее решение [148—160]. Цикл работ, посвященных этому вопросу, был начат рассмотрением дифракции поверхностной волны на изломе импедансной плоскости [148]. Вскоре после этого было исследовано возбуждение импедансного клина нитевидным магнитным источником, расположенным в вершине [149], возбуждение двугранного прямого угла с импедансными гранями [150], дифракция цилиндрических волн на импедансном клине [151], дифрак-

ция плоской однородной электромагнитной волны на импедансной ступеньке [153], дифракция поверхностной волны, набегающей под произвольным углом на излом импедансной плоскости [154]. Логическим завершением и обобщением этих исследований явилось решение дифракционных задач для клина, расположенного в анизотропной плазме [155—159]. Введение анизотропии нетривиальным образом усложняет проблему, превращая ее в граничную задачу с так называемой «косой производной» [155—157, 159]. Возникшие при этом трудности удалось преодолеть путем введения новой специальной мероморфной функции [156, 158]. Развитый метод позволил решить чрезвычайно общую задачу о дифракции цилиндрических волн на импедансном клине в анизотропной плазме [157], включающую в себя как частные случаи все ранее решенные двумерные задачи дифракции в клиновидных областях.

Анализ решений задач дифракции на клине позволил обнаружить ряд физических эффектов, имеющих прикладной интерес. В частности, показано, что при определенных углах раскрыва клина поверхностная волна, набегающая по одной из граней, полностью переходит на вторую грань либо полностью отражается [148], что вариацией положения линейного источника в прямоугольной клиновидной области с импедансными гранями можно достичь полного гашения поверхностных волн на гранях клина или, наоборот, возбуждать эти волны с максимальной амплитудой [150, 152], что при косом набегании поверхностной волны на ребро клина выполняются законы Снелля для поверхностных волн [154].

Наряду с фундаментальной проблемой данного круга задач — задачей о дифракции волн на клине в анизотропной плазме — были рассмотрены и некоторые другие, а именно: возбуждение поверхностных волн на импедансной плоскости в анизотропной плазме [161], дифракция на полуплоскости, расположенной на границе раздела между вакуумом и анизотропной плазмой [162], возбуждение слоя гидротропной плазмы или феррита плоским волноводом [163]. Эти дифракционные модели характеризуются большим разнообразием волновых явлений, обусловленных анизотропией среды. Анализ этих явлений оказался возможным благодаря предложенному в [164] оригинальному приему решения функциональных уравнений с ядром, не обладающим свойством четности относительно своего аргумента.

Одним из важных частных случаев импедансного клина являются плоскость с прямолинейным разрывом поверхностного импеданса и импедансная полуплоскость. Для этих объектов удалось рассмотреть не только двумерные, но и группу квазитрехмерных и трехмерных задач [165—175]. Как показали первые исследования, решения квазитрехмер-

ной и трехмерной задач в скалярном варианте [165, 166] получаются из соответствующих решений двумерных задач простым формальным путем. Однако исследование аналогичных проблем для электромагнитных волн требует особого рассмотрения, связанного с обобщением метода факторизации. Такое обобщение сделало в работах [167, 168, 171—173]. Оно позволило детально изучить процессы дифракции пространственных и поверхностных волн на простейших плоских неоднородных импедансных системах [167—170], а также рассмотреть возбуждение их электрическим и магнитным диполями произвольной ориентации, в том числе расположенными на разрыве поверхностного импеданса [171—173]. Результаты работ [165—167] были в дальнейшем использованы в теории открытых плоских волноводов поверхностных волн [176—178], а результаты работы [172] — для рассмотрения «береговой рефракции» радиоволн в случае расположения обоих корреспондирующих пунктов вблизи береговой линии [172]. Часть полученных результатов нашла экспериментальное подтверждение [174].

С середины 60-х годов получают развитие исследования по возбуждению и дифракции электромагнитных волн на анизотропно проводящих поверхностях. Эти исследования начались с работ [179—181], в которых для анизотропно проводящей модели плоских спиральных антенн решены осесимметричные задачи электродинамики. Дальнейшие исследования позволили установить особую роль отдельных участков логопериодических и конических спиральных антенн в формировании диаграмм направленности [182, 183] и таким образом выяснить физический механизм излучения таких антенн. В 1968—1970 гг. сформулирована более общая задача теории спиральных антенн — задача об электромагнитном возбуждении спирально проводящей конической поверхности, для решения которой впервые применен метод интегрального преобразования Конторовича-Лебедева [184]. В общем случае эта задача сведена к функциональным уравнениям в конечных разностях с переменными коэффициентами, а в ряде частных случаев [184—187] ее решение было получено в замкнутой форме. Дальнейшее использование интегрального преобразования Конторовича-Лебедева в сопостановке решить задачи об излучении и рассеянии волн четании с методом факторизации дало возможность в строгой радиально проводящими коническими и биконическими вибраторами [188, 189]. Были рассмотрены также задачи об электромагнитном возбуждении систем из двух тел (конуса и сферы), поверхность одного из которых идеально проводящая, а другого — имеет анизотропную проводимость. Для их решения предложено использовать метод, основанный на переразложении решения в ряды по полным системам

функций, ортогональных на соответствующих интервалах [190]. Этим методом, в частности, решена задача для сферической спиральной антенны с экраном [191]. Аналитические решения граничных задач получены также для моделей плоских спиральных антенн с экраном [193] и спиральных антенн, выполненных на параболоиде вращения [194] и поверхности сферы [192].

В последние годы рассмотрен ряд задач об излучении из волновода с фланцем [195—202]. Эти задачи решались двумя путями: с помощью метода интеграла Вебера-Шафхейтлина [195—199] и вариационного подхода [200—202]. Исследован импедансный фланец [196], фланец, покрытый диэлектриком или плазмой [198], получено решение для круглого волновода с фланцем при симметричном [199] и несимметричном [197] возбуждении. При вариационном решении использовалось приближение в форме основной волноводной волны. Это приближение особенно подходит для вычисления входной проводимости излучателя. Таким путем рассмотрено возбуждение коаксиальным волноводом плоского слоя теплой плазмы, причем отмечены электроакустические резонансы, а также возбуждение слоя холодной плазмы и некоторые другие задачи [200—202].

§ 5. Исследование антенн и антенных решеток

С 1970 г. в СФТИ впервые в СССР начаты работы по исследованию и созданию антенн со встроенными электронными приборами — активных антенн. В качестве активных элементов использовались не только транзисторы, как это делалось за рубежом, но и электронные лампы [203] и туннельные диоды [204]. Основное внимание уделялось изучению диапазонных, направленных и шумовых свойств, а также выявлению факторов, определяющих работоспособность активных антенн. Исследования показали, что включение электронных приборов в короткие вибраторы (размеры которых составляют десятые или даже сотые доли длины волны) позволяет во много раз расширить их полосу пропускания [205], управлять формой диаграммы направленности и поляризационной характеристикой [205—207], существенно уменьшить взаимодействие между близкорасположенными активными антеннами [208, 209], что позволяет реализовать в антенных решетках из активных антенн «сверхнаправленный» режим.

В процессе исследования активных антенн были выявлены факторы, влияющие на их работоспособность, что позволило сформулировать принципы построения активных антенн и требования к активным элементам, встраиваемым в антен-

ну [210]. Так как активные антенны наиболее целесообразно использовать в качестве приемных, основным фактором, определяющим их работоспособность, является наличие шумов линейного и нелинейного происхождения, вносимых активным элементом. Поэтому было изучено влияние шумов активных элементов на помехозащищенность антенн и радиоприемной системы в целом. В результате найдены схемные решения, позволившие на 20—30 дБ увеличить динамический диапазон активных антенн [211] и тем самым существенно снизить уровень шумов нелинейного происхождения, играющих определяющую роль в коротковолновом диапазоне.

При разработке активных антенн и настройке активных элементов необходимо одновременно контролировать несколько параметров, которые связаны друг с другом сложной зависимостью. С этой целью разработана установка для автоматического измерения параметров активных элементов, позволяющая определять коэффициент передачи с учетом импедансных свойств пассивных частей активной антенны и его частотную зависимость, затухание продуктов нелинейных искажений, а также уровень линейных шумов на выходе [212].

Результаты этих исследований использованы при создании различных вариантов активных антенн со специальными характеристиками. Так, например, выявленная зависимость формы диаграммы направленности и поляризационной характеристики активной антенны от параметров и режима работы активного элемента использована при разработке активной телевизионной комнатной антенны [213], которая, имея малые размеры (не более 0,5 м), работает во всем телевизионном диапазоне частот и позволяет отстраиваться от мешающих сигналов, создающих повторы изображения.

С начала 70-х гг. в СФТИ выполнен также цикл работ, посвященных исследованию свойств фазированных антенных решеток. В основе этих работ лежит метод [214, 215], основанный на использовании формулы суммирования Пуассона, который позволил с единых позиций рассмотреть антенные решетки, расположенные как в свободном пространстве («прозрачные» решетки), так и решетки, расположенные на криволинейных металлических поверхностях («конформные» решетки). С помощью этого метода теоретически обоснована возможность построения криволинейной фазированной антенной решетки некруговой симметрии с широкоугольным сканированием, найдена геометрия решетки, при которой возможно малоискаженное сканирование в секторе $\pm 90°$, доказано, что наиболее предпочтительным с точки зрения малоискаженного сканирования является равномерное амплитудное распределение [216—218]. Установлено, что основное отличие в сканирующих свойствах «конформных»

и «прозрачных» решеток заключается в том, что у «конформных» решеток в процессе сканирования происходит падение коэффициента усиления и наблюдается смещение максимума характеристики направленности относительно задаваемого направления сканирования. Для «конформных» решеток с неравномерным амплитудным распределением, спадающим к краям решетки, коэффициент усиления при сканировании падает меньше, чем у решеток с равномерным амплитудным распределением, а запаздывание луча больше [219, 220]. Показано также, что с помощью криволинейных антенных решеток, состоящих из ненаправленных излучателей, в отличие от линейных, можно получить однонаправленное излучение [217].

ЛИТЕРАТУРА

1. Филоненко В. А., Таращук Ю. Е., Корниенко М. Г., Госенченко С. Г., Симакова Н. А. Труды юбилейной конференции. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967.
2. Филоненко В. А., Емельянов П. П., Стельмашенко В. Е., Радиотехника, 22, № 1, 1967.
3. Таращук Ю. Е., Госенченко С. Г. Доклады НТС, посвященной Дню радио. Томск, 1966.
4. Госенченко С. Г., Корниенко М. Г. Доклады НТС, посвященной Дню радио. Томск, 1966.
5. Госенченко С. Г., Корниенко М. Г. Электросвязь, № 8, 1967.
6. Корниенко М. Г., Симакова Н. А. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1965.
7. Березной Б. В., Ручкин В. В., Фортес В. Б. Труды XXI конф. по радиоэлектронике, 1971.
8. Филоненко В. А., Фортес В. Б., Тельпуховский Е. Д., Ручкин В. В. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 1, 1976.
9. Филоненко В. А., Ручкин В. В., Тельпуховский Е. Д., Фортес В. Б. Труды XI ВКВР. Казань, 1975.
10. Березной Б. В., Фортес В. Б. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1977.
11. Филоненко В. А., Ручкин В. В., Тельпуховский Е. Д., Фортес В. Б. Изв. вузов. Радиофизика, № 7, 1976.
12. Ручкин В. В., Тельпуховский Е. Д., Фортес В. Б. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1977.
13. Пономарев Г. А., Аржевикин Ю. А., Якубов В. П., Фортес В. Б. Изв. вузов. Радиофизика, № 9, 1978.
14. Ручкин В. В., Тельпуховский Е. Д., Фортес В. Б. Труды ВКВР, ч. 2. Томск, 1978.
15. Филоненко В. А., Румбешта Н. Н., Ручкин В. В., Фортес В. Б. Изв. вузов. Радиофизика, № 5, 1978.
16. Пономарев Г. А., Симакова Н. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Радиофизика, № 3, 1971.
17. Пономарев Г. А., Симакова Н. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Физика, № 1, 1971.
18. Пономарев Г. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Радиофизика, № 2, 1971.

19. Пономарев Г. А., Симакова Н. А. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1977.
20. Пономарев Г. А., Якубов В. П., Аржевикин Ю. А. Фортес В. Б. Доклады VII Всесоюзного симпозиума по дифр. и распр. волн. Ростов-на-Дону, 1977.
21. Пономарев Г. А., Аржевикин Ю. А., Якубов В. П., Фортес В. Б. Изв. вузов. Радиофизика, № 9, 1978.
22. Пономарев Г. А., Симакова Н. А. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1979.
23. Пономарев Г. А., Куликов А. Н., Марков Н. Г. Изв. вузов. Физика, № 9, 1978, деп. в ВИНИТИ № 3245—78.
24. Пономарев Г. А., Куликов А. Н., Марков Н. Г. Изв. вузов. Физика, № 3, 1979, деп. в ВИНИТИ № 924—79.
25. Иванчиков В. И. Изв. вузов. Радиофизика, № 1, 1958.
26. Иванчиков В. И. Радиотехника и электроника, № 7, 1961.
27. Пономарев Г. А., Якубов В. П., Марков Н. Г. В сб.: докладов юбилейной научно-техн. конф. РФФ, ч. II. Секция радиофизики и распространения волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
28. Пономарев Г. А. Сб. докладов XI Всесоюзной конф. по распространению волн. Казань, 1975.
29. Пономарев Г. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Радиофизика, № 3, 1976.
30. Пономарев Г. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Радиофизика, № 8, 1976.
31. Пономарев Г. А., Симакова Н. А., Якубов В. П. В сб. докладов юбилейной научно-техн. конф. РФФ, ч. II. Секция радиофизики и распространения волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
32. Пономарев Г. А., Симакова Н. А., Якубов В. П. Изв. вузов. Физика, № 5, 1974.
33. Пономарев Г. А. Сб. докладов X Всесоюзной конф. по распр. волн. Иркутск, 1972.
34. Пономарев Г. А. Труды СФТИ, вып. 64. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
35. Пономарев Г. А., Блаунштейн Н. Ш. В сб. докладов юбилейной научно-техн. конф. РФФ, ч. 2. Секция радиофизики и распространения волн. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
36. Булатов Н. Д. Авторское свидетельство СССР, кл. 21, д. 30, № 197780/50518, 1936.
37. Кессених В. Н., Булатов Н. Д., Лихачев А. И. Труды экспедиции по наблюдению полного солнечного затмения 19 июня 1936 г., т. 1. — Л.: Изд-во АН СССР, 1938.
38. Кессених В. Н. Булатов Н. Д., Бэрвальд Г. И., Денисов В. Г. ЖТФ, вып. 12, 1937.
39. Кессених В. Н. Труды СФТИ, вып. 1. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1940.
40. Ладыгин Д. А. Труды СФТИ, вып. 1. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1940.
41. Ладыгин Д. А., Серебряков Г. П. Труды СФТИ, вып. 1. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1940.
42. Целищев С. П. Труды СФТИ, вып. 1. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1940.
43. Кориневская Н. А. Труды СФТИ, вып. 1. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1940.
44. Кессених В. Н., Булатов Н. Д. ДАН **45**, № 6, 1944.
45. Лихачев А. И. ЖТФ, **10**, 1434, 1940.
46. Лихачев А. И. ДАН, **25**, № 7, 1949.

47. Лихачев А. И., Рудина М. П. Труды СФТИ, вып. 25. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1948.
48. Лихачев А. И. Труды СФТИ, вып. 33. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1954.
49. Лихачев А. И., Слухай А. И. Труды СФТИ, вып. 33. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1954.
50. Рудина М. П. Труды СФТИ, вып. 33. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1954.
51. Лихачев А. И. Труды СФТИ, вып. 39. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
52. Кессених В. Н. Изв. АН СССР. Сер. физическая, 2, вып. 2, 1947.
53. Кессених В. Н. Радиотехника, вып. 8, 1947.
54. Кессених В. Н. Труды СФТИ, вып. 41. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1962.
55. Кессених В. Н. Труды VIII Всесоюзной конф. по распр. радиоволн. Ашхабад, 1967.
56. Елизарьев Ю. Н. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
57. Тимченко Н. И. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
58. Лихачев А. И. Геомагнетизм и аэрономия, № 2, 1965.
59. Лихачев А. И. Труды СФТИ, вып. 41. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1962.
60. Лихачев А. И. Вопросы моделирования ионосферы. Калининград, 1975.
61. Лихачев А. И. В сб.: Физика ионосферы. — М.: Наука, 1978.
62. Лихачев А. И. В сб.: Ионосферные исследования. — М.: Наука, 1978.
63. Нестерова О. М., Лихачев А. И. В сб.: Ионосферные исследования. — М.: Наука, 1978.
64. Ковалевский А. Ф. Труды СФТИ, вып. 37. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1959.
65. Гордеев О. К., Ковалевский А. Ф., Лихачев А. И. Труды СФТИ, вып. 38. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
66. Гордеев О. К. Труды СФТИ, вып. 44.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
67. Гордеев О. К. Труды СФТИ, вып. 55. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967.
68. Гордеев О. К. Труды СФТИ, вып. 55. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967.
69. Гордеев О. К., Тимченко Н. И. Тезисы докладов Всесоюзной конф. по физике ионосферы. Ростов-на-Дону, 1974.
70. Новиков В. М., Коновалова Н. В. Тезисы докладов XI Всесоюзной конф. по распр. радиоволн, т. 1. Казань, 1975.
71. Карманов П. И., Тимченко Н. И., Гордеев О. К. Сб. трудов IV межведомственного семинара по моделированию ионосферы. Томск, 1978.
72. Филоненко В. А., Чеча В. А., Зеленков В. Е., Вышлов В. П. Труды СФТИ, вып. 37. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1959.
73. Чеча В. А. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
74. Чеча В. А., Зеленков В. Е. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
75. Корякин А. Г. Труды СФТИ, вып. 53. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1970.
76. Тараканов В. А., Таращук Ю. Е., Смирнов Ф. В. Информ. листок, ЦНТИ, № 18—76. Томск, 1976.

77. Киселев В. Ф., Смирнов Ф. В., Тараканов В. А. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
78. Киселев В. Ф., Смирнов Ф. В., Сулакшин С. С. Информ. листок, ЦНТИ, № 73—77. Томск, 1977.
79. Смирнов Ф. В., Сулакшин С. С. Приборы и техника эксперимента, № 2, 1979.
80. Киселев В. Ф., Смирнов Ф. В., Сулакшин С. С. Геомагнетизм и аэрономия, № 2, 1977.
81. Сарычев В. Т. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
82. Сарычев В. Т. Геомагнетизм и аэрономия, № 3, 1974.
83. Сарычев В. Т. Геомагнетизм и аэрономия, № 4, 1974.
84. Ветшев Ж. Н., Бочаров В. И., Афонина Л. Я. Труды СФТИ, вып. 41. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1962.
85. Ветшев Ж. Н., Нестерова О. М. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
86. Кашкин В. Б., Ветшев Ж. Н. Труды СФТИ, вып. 45. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1964.
87. Белов В. А., Ветшев Ж. Н. Авт. свид. СССР, кл. ЖО6 Ф15/36, № 442478, 1974.
88. Белов В. А., Ветшев Ж. Н. Авт. свид. СССР, кл. ЖО6 Ф15/36, № 551655, 1977.
89. Таращук Ю. Е., Ящук П. Н. Труды СФТИ, вып. 65. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975.
90. Таращук Ю. Е., Ящук П. Н. Геомагнетизм и аэрономия, № 6, 1975.
91. Борисов Б. Б., Петрушин Е. И., Таращук Ю. Е. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению радиоволн. Томск, 1977.
92. Борисов Б. Б., Петрушин Е. И., Таращук Ю. Е., Ящук П. Н. Доклады Юбилейной научно-техн. конф. РФФ. Томск, 1973.
93. Нагорский П. М. Геомагнетизм и аэрономия, № 1, 1979.
94. Нагорский П. М., Сарычев В. Т., Спицын В. Г. Тезисы докладов XII Всесоюзной конф. по распространению радиоволн, ч. 1. — М.: Наука, 1978.
95. Колесник А. Г. Вопросы моделирования ионосферы. Калининград, 1975.
96. Колесник А. Г. Геомагнетизм и аэрономия, № 2, 1975.
97. Колесник А. Г. Геомагнетизм и аэрономия, № 3, 1976.
98. Колесник А. Г., Чернышев В. И. Геомагнетизм и аэрономия, № 1, 1978.
99. Чернышев В. И., Колесник А. Г., Власов М. Н. Геомагнетизм и аэрономия, № 2, 1978.
100. Власов М. Н., Чернышев В. И., Колесник А. Г. Геомагнетизм и аэрономия, № 4, 1978.
101. Порошин В. В., Тресков Ю. А., Власов М. Н., Колесник А. Г., Чернышев В. И. В сб.: IV Межведомственный семинар по моделированию ионосферы. Томск, 1978.
102. Королев С. С., Колесник А. Г. Геомагнетизм и аэрономия, № 1, 1979.
103. Голиков И. А., Колесник А. Г., Сердюкова А. В. Материалы научно-практ. конф. «Молодые ученые и специалисты Томской области в девятой пятилетке». Томск, 1975.
104. Голиков И. А., Колесник А. Г. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
105. Кессених В. Н. ЖЭТФ, 2, 398, 1932.

106. Кессених В. Н. ЖТФ, 9, 1957, 1939.
107. Кессених В. Н. ДАН, 27, 558, 1940.
108. Бобровников М. С. Труды СФТИ, вып. 36. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
109. Бобровников М. С., Сазонов А. И., Старовойтова Р. П. Труды СФТИ, вып. 36.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
110. Филоненко В. А. Труды СФТИ, вып. 36. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
111. Филоненко В. А., Данилевич А. И. Труды СФТИ, вып. 28. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1957.
112. Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 1, 1958.
113. Бобровников М. С. Труды СФТИ, вып. 39. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
114. Бобровников М. С. Труды СФТИ, вып. 36. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
115. Бобровников М. С. Ученые записки ТГУ им. В. В. Куйбышева. № 28, Томск, 1957.
116. Бобровников М. С., Бабин Е. А. Изв. вузов. Физика, № 1, 1957.
117. Бобровников М. С., Грозин Г. В., Редькин Г. А. Труды СФТИ, вып. 39.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
118. Бобровников М. С., Кислицына В. И. Изв. вузов Физика, № 5, 1964.
119. Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 2, 1966.
120. Бобровников М. С., Пономарева В. Н., Фисанов В. В. Изв. вузов. Физика, № 6, 1966.
121. Смирнов В. П., Бобровников М. С., Гошин Г. Г. Радиотехника и электроника, № 10, 1964.
122. Бобровников М. С., Гошин Г. Г., Смирнов В. П. Радиотехника и электроника, № 6, 1965.
123. Гошин Г. Г. Изв. вузов. Физика, № 7, 1968.
124. Бобровников М. С., Фисанов В. В. Тезисы докладов научно-техн. конф. по применению волноводов в технике дальней связи и радиоэлектронике. М., 1967.
125. Бобровников М. С., Фисанов В. В. Доклады научно-техн. конф., посвященной Дню радио. Томск, 1966.
126. Бобровников М. С., Фисанов В. В. Труды СФТИ, вып. 54.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974.
127. Завьялов А. С. Труды СФТИ, вып. 39.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
128. Завьялов А. С. Изв. вузов. Радиотехника, № 5, 1962.
129. Завьялов А. С. Изв. вузов. Физика, № 10, 1968.
130. Завьялов А. С. Труды СФТИ, вып. 54.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974.
131. Завьялов А. С. Изв. вузов. Радиотехника, № 3, 1962.
132. Завьялов А. С., Миронов В. Л. Изв. вузов. Радиотехника, № 1, 1963.
133. Завьялов А. С., Клещук В. Т. Изв. вузов. Физика, № 2, 1967.
134. Завьялов А. С. Труды СФТИ, вып. 54. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974.
135. Бобровников М. С. Авт. свид. СССР, кл. 12а, 48, № 130934. Б. И., 1960, № 2.
136. Завьялов А. С., Пегов А. А. Авт. свид. СССР, кл. H01P 1/18. № 437160. Б. И., 1972, № 23.
137. Завьялов А. С. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 8, 1976.
138. Колпаков В. В. Изв. вузов. Радиофизика, № 2, 1958.
139. Завьялов А. С. Изв. вузов. Радиотехника, № 5, 1958.
140. Завьялов А. С. Изв. вузов. Радиотехника, № 6, 1958.

141. Колпаков В. В. Труды СФТИ, вып. 39.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1960.
142. Добровольский И. Ф. Труды СФТИ, вып. 36.—Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
143. Добровольский И. Ф. Труды СФТИ, вып. 36.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1958.
144. Бобровников М. С., Старовойтова Р. П., Смирнов В. П. Изв. вузов. Радиотехника, № 4, 1961.
145. Бобровников М. С., Смирнов В. П. Изв. вузов. Радиотехника, № 3, 1962.
146. Бобровников М. С., Миронов В. Л., Смирнов В. П. Изв. вузов. Радиотехника, № 2, 1964.
147. Бобровников М. С., Миронов В. Л., Смирнов В. П. Изв. вузов. Радиотехника, № 5, 1964.
148. Старовойтова Р. П., Бобровников М. С., Кислицына В. Н. Радиотехника и электроника, № 2, 1962.
149. Старовойтова Р. П., Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 4, 1962.
150. Бобровников М. С., Старовойтова Р. П. Радиотехника и электроника, № 11, 1962.
151. Бобровников М. С., Старовойтова Р. П. Изв. вузов. Физика, № 6, 1963.
152. Бобровников М. С., Мышкин В. Г., Старовойтова Р. П. Радиотехника и электроника, № 10, 1963.
153. Бобровников М. С., Кислицына В. Н. Радиотехника и электроника, № 9, 1964.
154. Бобровников М. С., Пономарева В. Н., Мышкин В. Г., Старовойтова Р. П. Изв. вузов. Физика, № 1, 1965.
155. Бобровников М. С., Фисанов В. В. Изв. вузов. Физика, № 12, 1967.
156. Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 5, 1968.
157. Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 11, 1968.
158. Бобровников М. С. Изв. вузов. Физика, № 12, 1970.
159. Бобровников М. С., Фисанов В. В. Изв. вузов. Физика, № 3, 1972.
160. Бобровников М. С., Замараева В. П. Изв. вузов. Физика, № 3, 1973.
161. Фисанов В. В. Изв. вузов. Радиотехника, № 1, 1970.
162. Фисанов В. В. Изв. вузов. Радиофизика, № 2, 1971.
163. Фисанов В. В. Изв. вузов. Физика, № 1, 1972.
164. Фисанов В. В. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению волн. Томск, 1977.
165. Мышкин В. Г. Акустич. журнал, 351, 1966.
166. Мышкин В. Г. Изв. вузов. Физика, № 2, 1968.
167. Миронов В. Л., Мышкин В. Г. Радиотехника и электроника, 1211, 1967.
168. Миронов В. Л., Мышкин В. Г. Изв. вузов. Физика, № 1, 1967.
169. Миронов В. Л., Толкачев Д. Д. Изв. вузов. Радиофизика, № 3, 1968.
170. Дмитренко А. Г., Миронов В. Л. Изв. вузов. Радиофизика, № 4, 1968.
171. Мышкин В. Г. Изв. вузов. Радиофизика, 936, 1972.
172. Дмитренко А. Г., Мышкин В. Г. Изв. вузов. Физика, № 2, 1969.
173. Дмитренко А. Г., Мышкин В. Г. Изв. вузов. Физика, № 4, 1969.
174. Дмитренко А. Г. Изв. вузов. Физика, № 11, 1969.
175. Дмитренко А. Г. Изв. вузов. Физика, № 9, 1972.

176. Миронов В. Л., Шевченко А .А. Изв. вузов. Физика, № 1, 1971.
177. Мальцев В. П., Миронов В. Л., Шевченко В. В. Радиотехника и электроника, 427, 1971.
178. Дмитренко А. Г., Мышкин В. Г. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
179. Горощеня А. Б. Радиотехника и электроника, № 4, 1966.
180. Горощеня А. Б. Радиотехника, № 5, 1966.
181. Гошин Г. Г., Горощеня А. Б. Радиотехника и электроника, № 5, 1967.
182. Горощеня А. Б. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 2, 1967.
183. Горощеня А. Б., Карманов П. И. Радиотехника и электроника, № 8, 1967.
184. Гошин Г. Г., Толполарь Ш. Е. Радиотехника и электроника, № 12, 1970.
185. Гошин Г. Г., Агеев О. И. Радиотехника и электроника, № 1, 1972.
186. Гошин Г. Г. Радиотехника и электроника, 1975, № 10.
187. Гошин Г. Г., Беличенко В. П. В кн.: Теория дифракции и распространения волн, ч. 2. Ереван, 1973.
188. Гошин Г. Г., Кравченко Г. Г., Мышкин В. Г., В кн: Теория дифракции и распространения волн, т. 2. М., 1977.
189. Гошин Г. Г., Кравченко Г. Г., Мышкин В. Г. Радиотехника и электроника, 25, № 2, 1980.
190. Беличенко В. П., Гошин Г. Г. В кн.: Теория дифракции и распространения волн, т. 3. М., 1977.
191. Беличенко В. П., Гошин Г. Г. Изв. вузов. Радиофизика, 22, № 9, 1979.
192. Беличенко В. П., Гошин Г. Г. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1977, № 8.
193. Гошин Г. Г., Замараева В. П. Изв. вузов. Радиофизика, № 5. 1977.
194. Беличенко В. П., Гошин Г. Г., Кравченко Г. Г. Радиотехника и электроника, № 1, 1976.
195. Бобровников М. С., Комаров С. А., Фисанов В. В. В кн.: Теория дифракции и распространения волн, т. 1, М., 1977.
196. Комаров С. А. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 2, 1976.
197. Комаров С. А. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 8, 1977.
198. Комаров С. А. Материалы 1-й конф. молодых ученых, вып. 3. Томск, 1975.
199. Комаров С. А. Материалы научн.-практ. конф. «Молодые ученые и специалисты Томской области в 9-й пятилетке». Секция радиофизики и оптики. Томск, 1975.
200. Бобровников М. С., Комаров С. А., Фисанов В. В. Доклады юбилейной научн.-техн. конф. РФФ, ч. 2. Томск, 1973.
201. Фисанов В. В., Комаров С. А., Бобровников М. С. В кн.: Теория дифракции и распространения волн. VI Всесоюзный симпозиум по дифракции и распространению волн, т. 2. Москва — Ереван, 1973.
202. Бобровников М. С., Камаров С. А., Тимошенко В. И., Фисанов В. В. Изв. вузов. Физика, 1975, № 10.
203. Буянов Ю. И., Березной Б. В., Рубинштейн В. Я. Материалы XVIII научн.-техн. конф. по радиоэлектронике. Томск, 1971.
204. Рыбаков Б. М. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
205. Буянов Ю. И., Ночевский В. В., Онучин В. А., Смирнов В. П., Шапиро Г. Я. Доклады юбилейной научн-технич. конф. РФФ, ч. 2. Томск, 1973.

206. Буянов Ю. И., Высоцкий В. М., Головин А. В., Рыбаков Б. М., Шапиро Г. Я. Материалы научн.-практ. конф. «Молодые ученые и специалисты Томской области в IX пятилетке». Томск, 1975.
207. Буянов Ю. И., Климашевская В. А., Онучин В. А. Материалы региональной научно-практической конф. «Молодые ученые и специалисты — народному хозяйству». Томск, 1977.
208. Буянов Ю. И., Высоцкий В. М., Смирнов В. П. Сборник работ аспирантов радиофизического факультета. Томск, 1972.
209. Буянов Ю. И., Высоцкий В. М., Смирнов В. П. Доклады юбилейной научн-техн. конф. РФФ, ч. 2. Томск, 1973.
210. Буянов Ю. И., Смирнов В. П. Активные антенны. Томск, 1976.
211. Буянов Ю. И., Рыбаков Б. М., Поджунас Ю. М. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.
212. Буянов Ю. И., Рыбаков Б. М. Материалы 1-го Всесоюзного симпозиума «Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах». Минск, 1977.
213. Буянов Ю. И., Климов В. П. Информационный листок ЦНТИ, № 15—76, Томск, 1976.
214. Чуйков В. Д. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1978, № 8.
215. Чуйков В. Д., Смирнов В. П., Головин А. В. Радиотехника и электроника, № 10, 1974.
216. Чуйков В. Д., Смирнов В. П., Климашевская В. А. Сб. работ аспирантов радиофизического факультета, — Томск.: Изд-во Томск. ун-та, 1972.
217. Чуйков В. Д. Изв. вузов. Радиоэлектроника, № 8, 1974.
218. Смирнов В. П., Чуйков В. Д. В сб.: Антенны, вып. 19. —М.: Связь, 1974.
219. Головин А. В., Чуйков В. Д. Материалы 1-й конференции молодых ученых. Секция математики, физики и радиофизики, — Томск.: Изд-во Томск. ун-та, 1975.
220. Чуйков В. Д. Юбилейный сборник научных работ, посвященный 25-летию радиофизического факультета. Томск, 1978.

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПТИКЕ И СПЕКТРОСКОПИИ В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Н. А. ПРИЛЕЖАЕВА, В. С. МЕЛЬЧЕНКО, В. И. ДАНИЛОВА

Исследования в области оптики и спектроскопии в Томском университете интенсивно стали развиваться со времени организации лаборатории спектроскопии в составе СФТИ в 1935 г. Организатором и руководителем лаборатории стала Н. А. Прилежаева. Научная тематика лаборатории и открытой в 1940 г. кафедры оптики и спектроскопии строилась первоначально в двух направлениях: 1. Изучение спектров и фотохимических процессов в сложных молекулах. 2. Изучение влияния различных процессов взаимодействия (столкновений, адсорбции и др.) на спектры излучения и поглощения. В дальнейшем в связи с работами по спектральному анализу, ставшими особенно необходимыми в годы Великой Отечественной войны, были начаты и получили широкое развитие исследования процессов излучения в газоразрядной плазме. В 1956 г. в лаборатории спектроскопии были начаты работы по оптике и спектроскопии атмосферы группой сотрудников под руководством В. Е. Зуева. В 1960 г. это направление было выделено в отдельную лабораторию, на базе которой в дальнейшем в Томске был создан Институт оптики атмосферы СО АН СССР.

I. Работа по спектральным исследованиям различных типов газоразрядной плазмы

В цикле работ Н. А. Прилежаевой и ее учеников (О. П. Семеновой, В. И. Даниловой, В. Н. Горячева, В. П. Сычева, Н. К. Рубцовой, В. С. Мельченко, М. А. Алексеева и др.) был выполнен ряд основополагающих исследований по изучению механизма разрядов атмосферного давления (дуга, искра) и практического их использования для целей спектрального анализа [1—13]. Для характеристик излучения отдельных спектральных линий и полос при термическом возбуждении оказались весьма полезными введенные Н. А. Прилежаевой функции температурного возбуждения. Существенные результаты, позволившие устранить принци-

пиальные затруднения, возникшие при применении термической теории к дуговому разряду для количественных оценок, были получены путем использования введенного О. П. Семеновой эффективного ионизационного потенциала плазмы. В лаборатории впервые разными методами были выполнены оценки абсолютных концентраций атомов, поступающих в плазму разряда из электродов. Оказалось, что пары электродов составляют порядка 10% от общего состава плазмы, но низкий потенциал ионизации этой компоненты приводит к ее очень существенной роли в механизме протекания разряда. В результате изучения поведения интенсивности излучения атомов легко ионизируемых примесей при термических условиях возбуждения выявлены общие закономерности зависимости интенсивностей спектральных линий от температуры плазмы. Впервые установлено, что зависимость интенсивности от температуры для плазмы сложного состава может иметь не один максимум. Была обнаружена саморегулировка разряда — установление температуры в зависимости от состава плазмы. Выявлено влияние вида атмосферы (молекулярные и инертные газы) и электродных паров на электропроводимость и теплопроводимость дугового газа и изучена роль этих процессов в формировании токопроводящей зоны.

Результаты исследований разрядов при атмосферном давлении использованы для общего подхода к подбору оптимальных условий возбуждения аналитических линий, подавления нежелательного влияния «третьих элементов» при проведении спектрального анализа [14—15]. Были разработаны методики спектрального анализа и внедрены в производство на металлургических заводах в Челябинске, Красноуральске, Усть-Каменогорске, Балхаше, Новосибирске, Белове, Новокузнецке и в других городах (выезжали на предприятия Н. А. Прилежаева, О, П. Семенова, В. И. Данилова, П. Н. Коханенко, Н. К. Рубцова, П. Н. Ткаченко и др.). Работы по спектральному анализу в полевых условиях для геологических поисковых работ выполнялись сотрудниками лаборатории и студентами (В. М. Кудрявцева, Ф. И. Вергунас, Г. С. Цикунов, В. Е. Зуев, В. П. Витковский, Э. А. Вебрас и др.).

В работах В. В. Коханенко, О. П. Семеновой, В. Н. Елизарьевой, Т. В. Виленской изучалось излучение дугового разряда при пониженном давлении и разряды переходного типа между тлеющим и дуговым [16—19]. Выяснены границы давления газа, при которых устанавливается термодинамическое равновесие. Найдена зависимость параметров плазмы от характеристик атомных уровней, излучение с которых используется для их оценки. Показана большая роль ступенчатых процессов в установлении равновесных заселенностей

уровней. Установлена связь между эффективными сечениями возбуждения электронным ударом и оптического возбуждения.

Важную роль для газоразрядной плазмы играет явление самопоглощения (реабсорбции) излучения. Первые работы по исследованию этого явления были проведены в лаборатории спектроскопии В. С. Мельченко [20—22], затем они получили существенное развитие в работах Н. Г. Преображенского [23—26], А. В. Рукосуевой [27—28], И. И. Клыкова [29—30]. В работах [20—22] экспериментально исследовалась зависимость интенсивностей линии натрия, излучаемых дуговым разрядом, от абсолютной концентрации атомов натрия в плазме. Расчет кривых роста для центральной части дуги проводился с учетом уширения линий за счет столкновений и эффекта Допплера. Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволило сформулировать критерий для нахождения предельной концентрации атомов, при которой на интенсивность данной линии начинает резко влиять самопоглощение. Этот критерий обсуждался и уточнялся в дальнейшем с позиций более общей теории [23—26]. В этих работах получила существенное развитие теория излучения неоднородного оптически плотного слоя плазмы и показан целый ряд ее важных приложений в науке и технике. Разработан способ определения степени неоднородности плазмы по самообращенным мультиплетам и два новых способа определения степени неоднородности по контуру одиночной реабсорбированной спектральной линии. Впервые рассмотрена проблема редукции сложного самообращенного контура к идеальному спектральному прибору, показано, что расстояние между вершинами в самообращенном контуре практически не искажается аппаратом. Рассмотрены различные методы определения характеристик плазмы по реабсорбированному контуру спектральной линии.

В теории интегральной интенсивности спектральной линии при наличии эффекта реабсорбции наиболее интересным новым результатом представляется обобщение кривых роста Ван-дер-Хельда на случай неоднократного слоя плазмы. Впервые отмечена замечательная особенность этих кривых: при некоторых условиях существует участок «аномального поглощения», на котором прирост оптической плотности сопровождается уменьшением эквивалентной ширины линии. Теоретически оценена граница оптической толщины слоя, ниже которой учет ассиметрии начального нереабсорбированного контура линии не является существенным для полной интенсивности линии. Рассмотрена проблема учета эффекта реабсорбции при количественном спектральном анализе.

Экспериментальное исследование оптически плотной неоднородной плазмы дугового разряда методом линейного поглощения проведено в работах [27, 28]. Показана применимость метода линейного поглощения к неоднородным источникам плазмы для определения оптической плотности слоя и, следовательно, концентрации атомов или сил осцилляторов спектральных линий. Измерена степень неоднородности дугового разряда. Теория метода линейного поглощения расширена на случай линии с частично перекрывающимися компонентами.

Изучению явления реабсорбции излучения в электронно-колебательной полосе двухатомной молекулы с неперекрывающейся вращательной структурой посвящены работы [29, 30]. Рассмотрен общий случай, когда линии в полосе имеют фойгтовский контур, учтена разница во вращательной структуре верхнего и нижнего электронных состояний, проанализировано влияние типа связи между электронным и вращательным движениями, рассмотрено влияние ядерного спина в спектре гомоядерных молекул на функцию реабсорбции. Введены критерии неперекрываемости и перекрываемости спектральных линий. Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с излучением протяженного источника. Учтено отражение от стенок трубки в виде прямого кругового цилиндра и показано, что доля отраженного излучения может достигать 50% от прямого излучения.

Исследования импульсных разрядов представляют интерес для разработки мощных источников света, для получения активных сред импульсных газоразрядных лазеров и других целей. Цикл таких исследований выполнен под руководством В. С. Мельченко сотрудниками лаборатории В. В. Татариновым [31, 32], Н. А. Боковой, В. В. Поздеевым, С. С. Смоляковым [33, 34], Поздеевым В. В. совместно с сотрудниками ИОА СО АН СССР [35], Войтик И. Г. [36] и др. В работах [31—32] основной целью являлось определение концентрации электронов в апериодическом импульсном разряде трехзеркального лазерного интерферометра. Разряд протекал в прямых трубках, которые заполнялись чистыми газами (гелий, аргон, криптон, азот) и смесями (гелий-аргон, гелий-криптон) при давлениях 0,01—5 мм рт. ст. Исследовался спектр собственных частот трехзеркального лазерного резонатора. Проведены измерения электронных концентраций и скоростей их изменения во времени в интервале концентрации 10^{15}—$4 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$. Показано, что основным процессом деионизации плазмы в выбранных условиях является амбиполярная диффузия. Распределение электронных концентраций по сечению разряда соответствует функции Бесселя нулевого порядка. Измерены коэффициенты амбиполярной диффузии и рекомбинации.

Исследованиям импульсных разрядов в трубчатых лампах посвящены работы [33—34]. Изучены процессы в стандартных импульсных лампах ИФП-800, ИФП-5000 и модельных источниках. Наиболее подробно рассмотрены временные зависимости параметров импульсных разрядов в ксеноне. Кроме того, исследованы разряды в других инертных газах и в некоторых молекулярных газах (водород, азот, кислород, углекислый газ). Изучены динамика развития разряда и пространственно-временные зависимости интенсивностей излучения спектральных линий, суммарного свечения, температуры, концентрации электронов в плазме и электрические характеристики разрядов. Интересные особенности излучения импульсных разрядов в кварцевых трубках (появление вторичных максимумов излучения) были объяснены поступлением паров кремния со стенок трубки. Проявление этого эффекта было найдено наибольшим в атмосфере водорода, наименьшим — в ксеноне.

Найденные закономерности динамики развития разряда и свечения, изменения параметров плазмы во времени и в пространстве были использованы при разработках импульсных источников света для накачки лазеров.

Импульсный разряд в лазере на парах меди исследовался в работах [35]. Проведено измерение временного хода концентрации электронов в послесвечении разряда по ширине линии водорода в зависимости от условий возбуждения: рабочего напряжения на газоразрядной трубке, давления и рода буферного газа, частоты следования импульсов возбуждения, концентрации атомов меди. Впервые полученные обстоятельные данные об изменениях концентрации электронов при различных условиях возбуждения медного лазера необходимы для оптимизации работы данного ОКГ.

Было также изучено влияние радиальной неоднородности газоразрядной плазмы на параметры генерации медного лазера. Полученное радиальное распределение яркости свечения разряда показывает значительную радиальную неоднородность с максимумом в центре трубки. Фоторазвертка импульса генерации обнаружила, что генерация начинается раньше вблизи стенок трубки и имеется провал интенсивности в приосевой области. Обсуждение этого эффекта в совокупности с измеренными концентрациями электронов и температуры стенок трубки позволяет объяснить пространственно-временной профиль импульса генерации радиальными распределениями концентраций атомов меди в метастабильном и нормальном состояниях. Эти исследования имеют непосредственную связь с проблемой повышения КПД и мощности медного лазера.

Упомянем здесь также работы [36], в которых использована возможность описать кинетику взаимодействия час-

тиц в низкотемпературной плазме путем ее статистического моделирования методом Монте-Карло. Были изучены кинетические закономерности в плазме разряда процессов синтеза и диссоциации двуокиси углерода, взаимодействия водорода с кислородом, процессов электросинтеза окислов азота и аммиака и диссоциации последнего. Полученные данные дают информацию о поведении короткоживущих нестабильных промежуточных веществ в течение периода реакции и о влиянии каждой элементарной стадии на выход конечных продуктов.

Начиная с 50-х гг. в лаборатории спектроскопии интенсивно изучаются процессы излучения и заселения энергетических уровней атомов и молекул в разрядах неравновесного типа [37—69]. После появления лазеров интерес к этим работам стимулировался возможностями получения инверсии заселенностей в этих разрядах.

Изучению элементарных процессов заселения электронных, колебательных и вращательных уровней двухатомных молекул в положительном столбе тлеющего разряда были посвящены диссертации и последующие исследования В. В. Коханенко, Т. Н. Поповой, В. Н. Елизарьевой, Д. Н. Радикова, В. П. Сычева, И. И. Муравьева, А. Д. Каратеева, Л. А. Черненко, В. К. Сончик, О. В. Раводиной, В. Г. Блинковой [37—48]. Было показано, что при разряде в молекулярных газах и смесях атомных и молекулярных газов в возбуждении молекул кроме электронного удара могут играть важную роль удары второго рода, особенно при малых примесях молекулярных газов. Разработан метод определения эффективных сечений ударов второго рода по измерению интенсивностей спектральных линий. Получены особенности изменения температуры и концентрации электронов от условий разряда. Установлено, что заселенность колебательных уровней пропорциональна больцмановскому множителю с некоторой эффективной температурой, отличной от температуры газа и электронов, а распределение молекул по вращательным уровням подчиняется закону Больцмана с температурой, практически равной температуре газа. Особенно детально изучалась азотная плазма, создана схема скоростей возбуждения и дезактивации электронных состояний молекулы азота. Предложены методы корректного расчета вероятностей переходов в двухатомных молекулах на основе трехпараметрических функций потенциальной энергии.

Интересный по физическим процессам и перспективный для квантовой электроники тип неравновесного разряда — разряд в полом катоде (РКП) — изучался под руководством О. П. Семеновой в работах Т. М. Горбуновой, Т. Б. Сухановой, Н. В. Редькиной, З. С. Теодорович и др. [49—59]. Выполнены исследования вольтамперных характеристик, пара-

метров плазмы отрицательного свечения и прикатодной зоны РПК в присутствии различных по концентрации и составу электродных паров в широком интервале токов [49—51]. Выявлены основные стадии развития разряда, их характеристики, особенности характера излучения, обнаружено запирающее действие паров металлов в плазме при больших концентрациях. В обзорной работе О. П. Семеновой [52] впервые рассмотрена рекомбинация ионов с удаленным внутренним электроном для создания инверсных заселенностей, указана возможность получения инверсии для некоторых переходов за счет рекомбинационных процессов. В [53—59] исследовано излучение паров Cu, Ag и Au в РПК. Обнаружено, что заселенности уровней атомов Cu и Au с возбужденным электроном из внутренней оболочки резко превышают (до 1—3 порядков) заселенности уровней с возбужденным валентным электроном. Такое различие заселенностей получено впервые и объяснено действием процессов рекомбинации, сопровождающих процессы перезарядки. Оценены эффективные сечения процессов перезарядки атомов Cd и Au на ионах He. Выяснен механизм генерации лазеров на некоторых линиях Cd и Hg. Предложено использовать зависимость автоионизационных линий от силы тока для оценки концентрации паров металла в РПК. Предложен механизм передачи возбуждения между автоионизационными уровнями Ag и Cu, представляющих собой новый элементарный процесс взаимодействия между тяжелыми частицами.

Другая группа работ по исследованиям неравновесной плазмы РПК выполнена под руководством И. И. Муравьева А. Н. Солдатовым, В. М. Климкиным, А. М. Янчариной [60—63]. Установлены общие закономерности зависимости электрических и оптических характеристик для плазмы поперечного разряда с холодным полым катодом. Показана основная роль ударов второго рода в возбуждении уровней неона 2s и 3s при разряде в неоне и его смеси с гелием. Впервые обнаружено непосредственное влияние неупругих электронно-атомных столкновений на функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), приводящих к появлению структуры на ФРЭЭ. По наблюдаемой структуре на кривой ФРЭЭ предложен метод определения эффективных сечений соударений частиц. Этим методом впервые определено эффективное сечение образования молекулярного иона гелия и электрона с энергией 15 эВ при столкновении метастабилей гелия, определено также сечение ударов второго рода электронов с метастабилями гелия. Создан газоразрядный источник света с поперечным разрядом в полом катоде с низким уровнем шумов, удобный для исследования характеристик низкотемпературной плазмы. Гелий-неоновый лазер, изготовленный на основе предложенного источника света,

обладает более высоким коэффициентом усиления и мощностью по сравнению с подобными устройствами.

Особый интерес к процессам в области отрицательного тлеющего свечения (ОТС) стимулировался применением тлеющего разряда в приборах информационной техники. Под руководством И. И. Муравьева сотрудниками лаборатории Р. Г. Каримовым, Г. С. Евтушенко, В. С. Куровым проведен цикл исследований общих закономерностей излучения в ОТС и изучено его практическое применение [64—69]. Зондовым методом исследованы закономерности изменения ФРЭЭ в пространстве ОТС и в зависимости от рода газа. Так же как в плазме полого катода, в ОТС неупругие соударения частиц приводят к появлению структуры на ФРЭЭ при слабоаномальном разряде в гелии и ксеноне. По структуре на ФРЭЭ определены сечение и функции девозбуждения уровней ксенона электронами. Показана возможность определения ФРЭЭ по интенсивностям спектральных линий путем решения обратной задачи. Это позволяет расширить диапазон энергии и проводить оценку концентрации «быстрых» электронов, когда применение зондов затруднено. Впервые обнаружен экспоненциальный характер интенсивности спектральных линий с удалением от катода при нормальном и слабоаномальном разряде, что было связано с существованием пучка быстрых электронов, пронизывающих ОТС. На основе комплексных зондовых и оптических измерений изучен механизм возбуждения атомов ряда инертных газов в ОТС. Доминирующим процессом в кайме свечения является электронный удар. Высокая концентрация заряженных частиц и низкая средняя энергия электронов на «хвосте» ОТС аномального разряда приводят к рекомбинационному характеру заселения уровней. Рост средней энергии электронов при переходе от разряда в гелии к разряду в тяжелых инертных газах приводит к увеличению роли ступенчатых процессов в заселении уровней и ионизации. При некотором удалении от каймы ОТС важную роль в возбуждении отдельных уровней играют удары второго рода и процессы перезарядки. В частности, обнаружен перенос энергии от метастабильной колебательно возбужденной молекулы He_2 к ионам ряда инертных газов. Оценены эффективные сечения этих процессов. На основе результатов исследования характеристик ОТС был создан гелий—неоновый лазер оригинальной конструкции, который способен работать от сети переменного тока без специального блока питания.

Первые исследования, связанные с влиянием электрического поля на излучение атомов (эффект Штарка), начаты в лаборатории еще в 1948 г. [70—71]. В. Н. Гулько исследовал поведение запрещенных линий гелия в постоянном электрическом поле, В. И. Данилова наблюдала запрещенные

линии атома лития в микрополях плазмы дугового разряда. Появление новых экспериментальных и расчетных методов открыло возможность более глубокого изучения эффекта Штарка. С 1970 г. группой сотрудников (А. М. Янчарина, Л. В. Горчаков, В. П. Демкин) под руководством И. И. Муравьева ведутся комплексные экспериментальные и теоретические исследования по изучению влияния электрического поля на структуру уровней и излучение атомов [72—78]. Разработан оригинальный газоразрядный источник, позволяющий получать расщепление линий тяжелых инертных газов в полях напряженностью до 200 кВ/см. Предложен метод расчета расщепления уровней. Проведено исследование расщепления более пятисот уровней He, Ne, Ar, Kr, Xe. Полученные результаты существенно дополняют имеющиеся в литературе данные и дают полное представление о расщеплении линий атомов инертных газов.

Экспериментальное исследование зависимости интенсивностей спектральных линий гелия от напряженности электрического поля показало, что наблюдается существенное перераспределение интенсивности излучения по спектру. Анализ причин этого явления приводит к выводу, что оно обусловлено изменением вероятности переходов в атоме под влиянием электрического поля. Разработан метод расчета и выяснены общие закономерности изменения вероятности переходов в атомах инертных газов. Установлено, что в электрическом поле наряду с возрастанием вероятностей запрещенных переходов наблюдается значительное (до порядка величины) уменьшение вероятностей разрешенных переходов от напряженности поля, доказана анизотропность распределения интенсивности излучения. Предложен метод определения генеалогии штарковских состояний, который позволяет корректно описывать структуру уровней и излучения атома в области пересечения и антипересечения уровней. Полученные результаты существенным образом меняют наши представления об излучении атома и являются вкладом в теорию излучения атомов и атомных спектров.

II. Исследования по фотохимии, молекулярной спектроскопии и квантовой химии

В 30-х гг. под руководством Н. А. Прилежаевой был начат цикл исследований по фотохимическим процессам для бензола и ряда его производных типа C_6H_5X, где X — атом галогена или одна из групп OH, NH_2, NO_2 [79—80]. Было показано, что первичный фотохимический процесс заключается в отрыве атома H от бензола или соответствующего заместителя в его производных. При осуществлении внешних

воздействий на молекулу при ее адсорбции на различных поверхностях первичный фотохимический процесс не меняется, но протекает под действием более длинных волн. Выделяющиеся при этом свободные атомы и радикалы десорбируются с поверхности и дают начало различным вторичным химическим процессам в объеме. В случае химического взаимодействия с поверхностью (NO_2 на пленках бензола, фенола, нафталина, антрацена) обнаружено появление новых областей поглощения. Эти и другие опыты указывают на возможность выявления в электронном спектре активного переходного состояния химической реакции [81].

Работы по квантовой химии и молекулярной спектроскопии посвящены исследованию фотофизических процессов в сложных органических соединениях. Многообразие процессов, протекающих в молекулах при воздействии на них электромагнитного поля, требует широкого теоретического и экспериментального исследования изменения в электронной структуре, спектрах, процессах внутри- и межмолекулярного взаимодействия в рядах сходнопостроенных молекул. Такой комплексный подход реализован в работе лаборатории спектроскопии с целью развития теории спектров — изучения механизма формирования полос в спектрах поглощения и люминесценции — и на этой основе установления природы электронно-возбужденных состояний, предсказания изменения физико-химических свойств молекул, процессов взаимодействия и реакционной способности в возбужденном состоянии, изучение путей деградации энергии возбуждения (безызлучательные переходы) и генерации лазерного излучения органическими красителями. Подводя итоги многолетнего изучения этой проблемы (1950—1980 гг.), можно отметить следующие основные результаты.

В работах В. И. Даниловой с сотр. [82—97] установлен механизм формирования длинноволновых полос в электронных спектрах поглощения между π-орбиталями (ππ* переходы) в рядах органических соединений (алифатические и ароматические соединения с донорными и акцепторными группами) и в их комплексах [20—27]. Показана, что эта полоса имеет зарядопереносный характер и ее появление сопровождается существенным перераспределением электронной плотности на атомах, связях, фрагментах. Последнее сопровождается изменением всех свойств и процессов, за которые отвечает π-оболочка молекул (дипольные моменты, константы кислотности и основности, реакция замещения, присоединения и т. д.). В. Г. Плотниковым и И. В. Соколовой под руководством Н. А. Прилежаевой и В. И. Даниловой [98—103] изучено влияние n-электронов на спектры и физико-химические свойства. Показано, что относительное

расположение $n\pi^*$ и $\pi\pi^*$ переходов определяет спектрально-люминесцентные свойства молекул.

Изучение более коротковолновых полос требовало включения в рассмотрение всех валентных электронов. Работами В. Я. Артюхова, Ю. А. Тищенко, О. К. Базыль показано, что механизм формирования полос $\pi\sigma^*$, $\sigma\pi^*$ аналогичен $n\pi^*$ и $\pi\pi^*$ переходам и что их появление в спектрах должно сопровождаться также изменением всех свойств молекул [104—107]. В соединениях серы, фосфора, кремния при изучении природы полос необходимо производить учет d-орбиталей [108].

Для полос в спектрах поглощения, обусловленных запрещенными, интеркомбинационными переходами, показано существенное влияние на вероятность их электронных переходов процессов комплексообразования [109]. Для ряда соединений оказалось, что относительный вклад $T_i \rightarrow T_j$ переходов в $S_0 \rightarrow T$ определяется орбитальной природой нижнегоТ состояния и наиболее значителен для $n\pi^*$ состояния. Следует особо заметить, что при изучении природы полос в работах В. И. Даниловой и Ю. П. Морозовой [110—112] широко использовано межмолекулярное взаимодействие как метод определения роли отдельных видов электронов, фрагментов молекул в формировании полос в спектрах поглощения.

Р. М. Фофановой изучено тушение и разгорание люминесценции [113]. А. Ф. Терпуговой с сотр. [109] рассмотрены пути деградации энергии электронного возбуждения по разным каналам в зависимости от электронной структуры молекул, изомерии, изотопного эффекта, тяжелого атома. Дальнейшее теоретическое исследование процессов безызлучательной конверсии для конденсированной и газовой фазы проведено Г. В. Майером [114, 115]. Для потенциально способных к фотохимическому распаду молекул получена зависимость констант скоростей процессов внутренней и интеркомбинационной конверсии от вида энергетического спектра, запаса колебательной энергии и скорости колебательного перераспределения. Установлен механизм и дана теоретическая интерпретация эффекта ускорения процессов конверсии фотохимическими реакциями.

В связи с широким применением методов квантовой химии В. Я. Артюховым и В. П. Щербиной [116, 117] постоянно проводилось их совершенствование и создание новых алгоритмов и программ. Эти работы еще более развернулись вследствие перехода к комплексному решению спектральных задач и развитию исследований по лазерам на красителях. Так, созданы комплексы программ для расчета спектров, электронной структуры, межмолекулярных взаимодействий, молекулярного электростатического взаимодействия, спектров

перепоглощения, энергии химической связи [116]. Эти комплексы программ позволяют существенно уменьшить время счета и перейти к массовому расчету молекулярных структур. Разработана усовершенствованная схема оптимизации геометрии молекул [117]. Составленная программа позволяет решать разнообразные конформационные задачи в сложных молекулах. В. П. Щербина разработала эффективный комплекс программ для машин третьего поколения [117].

Теоретическое исследование природы полос и процессов взаимодействия в различных электронных состояниях нашло широкое применение при изучении механизма реакции замещения, природы формирования электронных спектров полизамещенных бензола, спектров фармакологических веществ, спектральных свойств фрагментов белков — алифатических аминокислот механизма реакций для получения инсектицидов и т. д. [118].

Исследования лазеров на красителях в лаборатории начаты в 1976 г. Эта область бурно развивается в связи с запросами практики — получение перестраиваемого по частоте излучения лазера на основе красителей. В отличие от многих эти исследования проводятся путем широкого и разностороннего экспериментального и теоретического изучения связи между электронной структурой, спектрально-люминесцентными, генерационными свойствами и фотохимической устойчивостью в рядах органических люминофоров (оксазолы, родамины, кумарины и их производные). Широкий набор объектов необходим для разработки общей теории генерации на сложных молекулярных системах, а также для перекрытия всего оптического диапазона длин волн. Поиск новых активных сред и способов улучшения характеристик ОКГ на красителях проводится на основе нового подхода, разработанного в лаборатории В. И. Даниловой, В. Г. Майером, Т. Н. Копыловой и О. К. Базыль [119]. Теоретическими методами рассчитывается электронная структура, спектры, межмолекулярное взаимодействие, константы излучательной и безызлучательной конверсии, квантовый выход. Предсказанные теоретически оптимальные молекулярные структуры были синтезированы, на этих соединениях Т. Н. Копыловой с сотр. получена самая коротковолновая генерация $\lambda = 327$ нм на фенилбензоксазоле при накачке эксимерным лазером $XeCl^*$ с $\lambda = 308$ нм. Плодотворность этого подхода проиллюстрирована на других классах молекул [120—122].

Дальнейшее развитие работ по получению генерации в ультрафиолетовой области спектра идет по линии расширения класса молекул за счет введения новых заместителей, смещающих спектр в коротковолновую область. Это выполнено на примере производных бензоксазола, флуорантена нафталина.

В настоящее время особенно большое значение придается получению генерации на красителях в газовой фазе, поскольку здесь может быть реализована экономически выгодная возможность возбуждения спектров генерации электронным пучком или в электрических разрядах. Уже получена генерация на парах фенилбензоксазола.

III. Исследования по оптике и спектроскопии атмосферы

Со времени начала работ по оптике атмосферы в лаборатории спектроскопии СФТИ в 1956 г. и до выделения большой группы сотрудников во главе с В. Е. Зуевым в организованный в 1969 г. Институт оптики атмосферы СО АН СССР эти работы велись по двум основным научным направлениям: 1) молекулярная адсорбционная спектроскопия атмосферных газов [125—142]; 2) оптика и спектроскопия светорассеивающих сред [143—167]. Основные результаты исследований обобщены в монографиях руководителя этого научного направления В. Е. Зуева [123—124]. Руководителями отдельных экспериментальных и теоретических работ были М. В. Кабанов, С. Д. Творогов, С. С. Хмелевцов.

После 1969 г. в СФТИ продолжаются исследования по оптике и спектроскопии атмосферы по программе, скоординированной с ИОА СОАН СССР. Они проводились под руководством М. В. Кабанова, а затем В. А. Донченко [168—185].

Экспериментальное исследование интегральной прозрачности для больших толщ приземного слоя атмосферы в спектральной области 0,7—14 мкм проведено на трассах от 1,2 до 10 км при различных метеоусловиях [125—130]. Измерено поглощение квазимонохроматического излучения атмосферными газами при использовании лазеров в качестве источников радиации. Измерения проводились как в условиях естественной атмосферы, так и в синтезированной атмосфере [131, 132]. Теоретически исследована тонкая структура спектров поглощения атмосферных газов с последовательным учетом колебательного и вращательного движения молекул [133—138]. Рассмотрены методы и проведены расчеты функций поглощения при неразрешенных спектрах в однородной и неоднородной средах [139—141]. Получены общие формулы для расчета вероятности многофотонных процессов и коэффициента поглощения при учете спектроскопического эффекта насыщения [142].

Проведены экспериментальные исследования спектральной прозрачности атмосферы и спектрального хода аэрозольных коэффициентов ослабления в видимой и инфракрасной области для тепловых источников и ОКГ [131, 132],

[143—149]. Найдены границы применимости закона Бугера для описания измеряемого затухания излучения в различных рассеивающих средах для точечных источников и узких световых пучков [150—152]. Исследованию закономерностей распространения когерентного и некогерентного излучения в различных рассеивающих средах посвящены работы [153—155]. Получены оптические постоянные воды в видимой и инфракрасной области [156]. Проведены теоретические исследования и расчет полидисперсных коэффициентов ослабления облаков, туманов, дымок в диапазоне длин волн 0,3—25 мкм [157, 158]. Доказаны некоторые теоремы о поле, дифрамированном одной частицей, и рассмотрена задач о рассеянии неоднородного поля [159—161]. Проблема установления связей между уравнениями Максвелла и кинетическими уравнениями переноса излучения в рассеивающей среде решена в работах [162—165]. Проведено численное решение уравнения переноса излучения в различных рассеивающих средах методом Монте-Карло [166, 167]. Получены новые данные о спектральной прозрачности атмосферы, исследуются атмосферно-оптические фоны [168, 169]. Были исследованы энергетические и поляризационные характеристики яркости и поляризации многократного рассеянного лазерного излучения. Была показана различная природа аэрозольного ослабления для длин волн меньше и больше 2 мкм и обнаружена немонотонная зависимость аэрозольного ослабления от влажности [170, 171]. Исследованы интерференционные эффекты при рассеянии излучения ОКГ в средах с плотной «упаковкой» рассеивателей и проанализировано поведение феноменологических характеристик рассеяния [172, 173]. Экспериментально изучены пространственно-временные флуктуации интенсивности рассеянного излучения, обусловленные интерференцией вторичных волн («пятнистая» структура) [172, 173].

Работа по переносу излучения через атмосферу [174, 175] позволили обосновать необходимость специального решения задачи о видении по вертикальным и наклонным трассам.

Создан комплекс аппаратуры для исследования распространения коротких (10^{-9} с) и сверхкоротких (10^{-11} с) лазерных импульсов в модельных и реальных средах. Он позволяет проводить исследования с переменными по длительности импульсами [176—178]. Для оптических импульсов с длительностью $5 \cdot 10^{-11}$ с обнаружено различие коэффициентов ослабления по сравнению с непрерывным излучением. Ведутся теоретические и экспериментальные исследования для объяснения этого интересного нового эффекта [176—179]. Исследования обратного рассеяния лазерных импульсов в морской атмосфере и модельных средах позво-

лили выявить ряд особенностей, связанных со структурой морской атмосферы, например случай полной деполяризации и «переполяризации» излучения за счет формы и ориентации частиц [180]. Пороводятся систематические измерения комплексных показателей преломления веществ, которые влияют на оптические характеристики атмосферы. Проведены измерения для воды, водных растворов солей, твердых естественных аэрозолей [181—185].

**
*

В научно-исследовательской работе по оптическим направлениям, которые упомянуты в данном обзоре, участвует большой коллектив сотрудников СФТИ, преподавателей физического и радиофизического факультетов, аспирантов и студентов. Проведен огромный объем исследований, получено очень много интересных научных результатов, которые из-за ограниченного объема статьи отражены в ней далеко не полностью. Достаточно сказать, что по этим направлениям защищено около 100 кандидатских диссертаций и 10 докторских диссертаций, а число публикаций, приведенных в списке литературы к данному обзору, составляет всего лишь около пятой части полной библиографии опубликованных работ. Научная тематика университета включена в координационные планы АН СССР и СО АН СССР. Поддерживается постоянная научная связь с вузами и НИИ нашего города, а также Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Свердловска, Чебоксар и многих других городов Советского Союза.

В Томском университете успешно развиваются исследования оптического направления по методике лекционных демонстраций. В данном обзоре это направление не нашло отражения и будет представлено в других материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прилежаева Н. А., Горячев В. Н. Изв. АН СССР. Сер. физ., **14**, № 6,732, 1950.
2. Прилежаева Н. А., Рубцова Н. К., Сычев В. П. Изв. АН СССР. Сер. физ., **11**, 239, 1947.
3. Мельченко В. С. ЖЭТФ, **28**, № 5, 628, 1955.
4. Рубцова Н. К. ЖЭТФ, **17**, 1005, 1947.
5. Алексеев М. А. Тр. СФТИ, **32**, 21, 1953.
6. Данилова В. И. Изв. АН СССР. Сер. физ., **11**, 252, 1947.
7. Семенова О. П. Изв. АН СССР. Сер. физ., **11**, 246, 1947.
8. Семенова О. П. ДАН, **51**, 9, 683, 1946.
9. Бокова Н. А., Семенова О. П., Петрова М. В. Изв. вузов СССР. Физика, № 5, 156, 1962.
10. Семенова О. П., Дуркина А. В. Опт. и спектр., **2**, 34, 1957.
11. Семенова О. П., Левченко М. А. ДАН, 151, 90, 1963.
12. Елизарьева В. Н., Семенова О. П., Суханова Г. Б. В сб.: Спектроскопия. Методы и приложения. — М.: Наука, 1969.

13. Семенова О. П. В сб.: Итоги исследований по физике (1917—1967). Томск, 1971.
14. Семенова О. П., Ткаченко П. Н. Изв. АН СССР. Сер. физ., 5, 325, 1941.
15. Н. А. Прилежаева, Семенова О. П. Изв. АН СССР. Сер. физ., **9**, 769, 1945.
16. Прилежаева Н. А., Коханенко В. В. ЖПС, **7**, 522, 1967.
17. Семенова О. П. Изв. АН СССР. Сер. физ., **11**, 246, 1947.
18. Семенова О. П., Коханенко В. В., Елизарьева В. Н. Труды СФТИ, № 28, 1949.
19. Семенова О. П., Виленская Т. В. Тр. СФТИ, № 35, 213, 1956.
20. Мельченко В. С. Изв. АН СССР. Сер. физ., **19**, № 1, 30, 1955.
21. Мельченко В. С. Опт и спектр., **1**, № 3, 321, 1956.
22. Бокова Н. А., Ивасенко Н. Ф., Мельченко В. С., Поздеев В. В. Изв. вузов. Физика, № 12, 19, 1979.
23. Преображенский Н. Г. Спектроскопия оптически плотной плазмы. — Новосибирск: Наука, 1971.
24. Преображенский Н. Г. Опт. и спектр., **7**, 273, 1959.
25. Преображенский Н. Г. Изв. вузов. Физика, № 6, 31, 1959.
26. Преображенский Н. Г. Изв. вузов. Физика, № 6, 173, 1959.
27. Рукосуева А. В. Опт. и спектр., **17**, 340, 1964.
28. Рукосуева А. В. Изв. вузов. Физика, № 2, 88, 1967.
29. Клыков И. И., Попова Т. Н. Изв. вузов. Физика, № 6, 24, 1972.
30. Клыков И. И., Попова Т. Н. Изв. вузов. Физика, № 6, 133, 1972.
31. Татаринов В. В., Полещук Л. Т., Мельченко В. С. Изв. вузов. Физика, № 3, 131, 1968.
32. Татаринов В. В. ЖПС, **9**, 369, 1968.
33. Бокова Н. А., Гуляев Ю. Н., Мельченко В. С., Поздеев В. В. Изв. вузов. Физика, № 5, 53, 1972.
34. Поздеев В. В. и др. В сб.: Спектроскопия и ее применение в геофизике и химии. — Новосибирск: Наука, 1975.
35. Елаев В. Ф., Мельченко В. С., Поздеев В. В., Солдатов А. Н. В сб.: Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. — Томск: Изд-во ИОА СО АН, 1979.
36. Басов Ю. Г., Войтик И. Г., Мельченко В. С. Изв. вузов. Физика, № 2, 27, 1975.
37. Прилежаева Н. А., Попова Т. Н. Изв. АН СССР. Сер. физ., **19**, 20, 1955.
38. Прилежаева Н. А. Изв. вузов. Физика, № 3, 8, 1958.
39. Прилежаева Н. А., Черненко Л. А. ЖПС, **3**, 9. 1965.
40. Сычев В. П. Опт и спектр., **6**, 419, 1959.
41. Радиков Д. Н. Изв. вузов. Физика, № 1, 45, 1957.
42. Сончик В. К. Тр. СФТИ, № 35, 226, 1956.
43. Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 6, 171, 1962.
44. Попова Т. Н. Изв. вузов. Физика, № 2, 44, 1958.
45. Елизарьева В. Н. Опт. и спектр., **3**, 61, 1957
46. Попова Т. Н., Прилежаева Н. А., Елисеев А. А., Стенина В. В. Изв. вузов. Физика, № 2, 57, 1971.
47. Раводина О. В., Попова Т. Н., Прилежаева Н. А. Опт. и спектр., **40**, 790, 1976.
48. Блинкова В. Г., Попова Т. Н. Опт. и спектр., **41**, 25, 1976.
49. Семенова О. П., Горбунова Т. М., Бокова Н. А., Суханова Г. Б. ЖПС, **9**, 937, 1968.
50. Суханова Г. Б., Семенова О. П. Изв. вузов. Физика, № 11, 147, 1970.
51. Горбунова Т. М., Семенова О. П. ЖПС, **17**, 592, 1972.

52. Семенова О. П. Изв. вузов. Физика, № 3, 104, 1971.
53. Семенова О. П., Суханова Г. Б. ЖПС, **13**, 956, 1970.
54. Суханова Г. Б., Семенова О. П. Изв. вузов. Физика, № 2, 99, 1970.
55. Семенова О. П., Суханова Г. Б., Теодорович З. С. ДАН. Физика, **203**, 557, 1972.
56. Семенова О. П., Елаев В. Ф. Изв. вузов. Физика, № 1, 143, 1975.
57. Горбунова Т. М. Изв. вузов. Физика, № 8, 149, 1977.
58. Гриднев А. Г. и др. Квантовая электроника, **5**, 1149, 1978.
59. Семенова О. П., Редькина Н. В. Изв. вузов. Физика, № 3, 134, 1980.
60. Муравьев И. И. и др. Изв. вузов. Физика, № **12**, 125, 1968.
61. Солдатов А. Н., Евтушенко Г. С., Муравьев И. И. Опт. и спектр. **34**, 13, 1973.
62. Солдатов А. Н., Евтушенко Г. С., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 5, 46, 1973.
63. Солдатов А. Н., Прилежаева Н. А. Изв. вузов. Физика, № 11, 51, 1971.
64. Солдатов А. Н., Муравьев И. И., Евтушенко Г. С. Изв. вузов. Физика, № 11, 120, 1974.
65. Евтушенко Г. С., Гриднев А. Г., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 9, 80, 1975.
66. Солдатов А. Н. и др. Опт. и спектр., **39**, 1035, 1975.
67. Каримов Р. Г., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 6, 87, 1975.
68. Куров В. С., Муравьев И. И. В сб.: Прикладная спектроскопия. — М.: Наука, 1977.
69. Муравьев И. И., Янчарина А. М. Авт. свидетельство № 607498, 1978.
70. Прилежаева Н. А., Данилова В. И., Гулько Б. Н. Изв. АН СССР. Сер. физ., 12, 362, 1948.
71. Данилова В. И. Тр. СФТИ, № 2, 279, 1949.
72. Муравьев И. И., Янчарина А. М., Мельченко В. С. Изв. вузов. Физика, № 7, 35, 1972.
73. Горчаков Л. В., Янчарина А. М., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 7, 91, 1972.
74. Горчаков Л. В., Груздев П. Ф. Опт. и спектр., **35**, 387, 592, 1973.
75. Янчарина А. М., Муравьев И. И. Опт. и спектр., **39**, 223, 1975.
76. Демкин В. П., Янчарина А. М., Муравьев И. И. Опт. и спектр., **47**, 8, 1979.
77. Горчаков Л. В., Янчарина А. М., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, **3**, 50, 1974.
78. Демкин В. П., Муравьев И. И. Изв. вузов. Физика, № 3, 67, 1979.
79. Прилежаева Н. А. Ж. физ. хим., **13**, 486, 1939.
80. Прилежаева Н. А. Ж. физ. хим. **30**, 1044, 1956.
81. Прилежаева Н. А., Кудрявцева В. М. Acta physicochimica URSS, **8**, 211, 1938.
82. Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 6, 66, 1961.
83. Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 2, 141, 1962.
84. Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 4, 107, 1962.
85. Данилова В. И., Лагутская Л. И. ЖСХ **6**, 591, 1965.
86. Пономарев О. А., Данилова В. И. В сб.: Органические комплексные соединения. Томск, 1965.
87. Данилова В. И., Беломытцев С .Я. Изв. вузов. Физика, № 4, 145, 1967.

88. Данилова В. И., Беломытцев С. Я. Изв. вузов. Физика, № 7, 152, 1937.
89. Данилова В. И., Беломытцев С. Я. Изв. вузов. Физика, № 8, 134, 1969.
90. Данилова В. И., Беломытцев С. Я. Изв. вузов. Физика, № 9, 126, 1968.
91. Данилова В. И., Беломытцев С. Я. Изв. вузов. Физика, № 1, 156, 1971.
92. Данилова В. И., Беломытцев С. Я. Изв. вузов. Физика, № 5, 79, 1971.
93. Данилова В. И., Прилежаева Н. А., Терпугова А. Ф., Беломытцев С. Я. Итоги исследований по физике (1917—1967). Томск, 1971.
94. Данилова В. И. В сб.: Спектроскопия, методы и применение. — М.: Наука, 1974.
95. Базыль О. К., Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 5, 121, 124, 134, 1968.
96. Данилова В. И., Хаустова В. И., Круликовская Е. А. Изв. вузов. Физика. № 5, 14, 1973.
97. Данилова В. И., Туровец А. Г. Изв. вузов. Физика, № 8, 68, 1973.
98. Данилова В. И., Прилежаева Н. А., Плотников В. Г. В сб.: Итоги исследований по физике (1917—1967). — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971.
99. Данилова В. И., Плотников В. Г. Опт. и спектр., **18**, 156, 1965.
100. Плотников В .Г., Данилова В. И., Шигорин Д. Н. ЖФХ. **29**, 231, 1965.
101. Соколова И. В., Данилова В. И. В сб.: Международная конференция по квантовой химии, биологии и фармакологии. Киев, 1978.
102. Соколова И. В. Изв. АН СССР. Сер. физ., № 3, 42, 1978.
103. Соколова И. В. Опт. и спектр., **45**, 269, 1978.
104. Артюхов В. Я., Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 2, 104, 1974.
105. Тищенко Ю. А., Орловская Л. В., Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 11, 1978.
106. Ю. А. Тищенко, Орловская Л. В. Изв. вузов. Физика, № 5, 159, 1975.
107. Тищенко Ю. А., Орловская Л. В., Данилова В. И. Изв. вузов. Физика, № 1, 141, 1979.
108. Хаустова В. И. Изв. вузов. Физика, № 9, 180, 1976.
109. Терпугова А. Ф. Физические проблемы спектроскопии. т. 1,— М.: Наука, 1963.
110. Данилова В. И., Морозова Ю. П. Опт. и спектр., **12**, в. 1, 1962.
111. Копылова Т. Н., Морозова Ю. П., Фофонова Р. М. Изв. вузов. Физика, № 8, 13, 1973.
112. Пономарев О. А., Данилова В. И., Морозова Ю. П. В сб.: Водородная связь. Наука, 1964.
113. Фофонова Р. М. В сб: Спектроскопия. Методы и применения. — М: Наука, 1969.
114. Майер Г. В. Изв. АН СССР. Сер. физ., 42, 366, 1978.
115. Майер Г. В., Плотников В. Г. Опт. и спектр., 47, 113, 310, 1979.
116. Артюхов В. Я. ЖСХ, **19**, 418, 1978.
117. Щербина В. П., Тищенко Ю. А., Данилова В. И. Изв. вузов. Физика. Деп. ВИНИТИ, рег. № 2998—74.
118. Миллиаресси Е. Е., Данилова В. И., Минаев Б. Ф., Барабашева Г. Д. Опт. и спектр., **30**, в. 5, 1976.

119. Базыль О. К., Данилова В. И., Копылова Т. Н., Майер Г. В. Опт. и спектр., 48, 262, 1980.
120. Данилова В. И., Дегтяренко К. М., Грузинский В. В. и др. В сб.: Нелинейное резонансное преобразование частоты лазерного излучения. Ташкент, 1979.
121. Баркова А. А., Грузинский В. В., Данилова В. И. и др. Препринт № 169. Генерация излучения на растворах 2-фенил бензоксазола в ультрафиолетовой области спектра. — Минск.: Изд-во ИФ БССР, 1978.
122. Копылова Т. Н., Грузинский В. В., Данилова В. И. и др. Препринт № 150. Генерация излучения органическими молекулами при накачке азотным лазером и аксимерным лазером XeCl*.—Минск: Изд-во ИФ АН БССР, 1978.
123. Зуев В. Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. — М.: Советское радио, 1966.
124. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. — М.: Советское радио, 1970.
125. Антипов Б. А., Зуев В. Е., Коханенко П. Н. и др. Изв. вузов. Физика, № 2, 105, 1960.
126. Антипов Б. А., Зуев В. Е., Коханенко П. Н. и др. Изв. вузов. Физика, № 3, 72, 1960.
127. Антипов Б. А., Зуев В. Е., Коханенко П. Н. и др. Изв. вузов. Физика, № 1, 17, 1961.
128. Зуев В. Е. Изв. вузов. Физика, № 6, 176, 1962,
129. Зуев В. Е., Эляшберг М. Е., Сафронова Г. А. Изв. вузов. Физика, № 5, 1960.
130. Зуев В. Е., Кошелев Б. П. Изв. вузов. Физика. № 6, 172, 1961.
131. Зуев В. Е., Покасов В. В., Пхалагов Ю. А. и др. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, 4, № 1, 1968.
132. Антипов Б. А., Зуев В. Е., Сапожникова В. А. Изв. вузов. Физика, № 7, 142, 1967.
133. Ипполитов И. И., Макушкин Ю. С. Опт. и спектр., **24**, 530, 1968.
134. Зуев В. Е., Ипполитов И. И., Макушкин Ю. С. и др. ДАН, 179, 51, 1968.
135. Зуев В. Е., Ипполитов И. И., Макушкин Ю. С. и др. Опт. и спектр., 25, в. 1, 1968.
136. Зуев В. Е., Ипполитов И. И., Макушкин Ю. С. и др. Доклад на 14-й Генеральной Ассамблеи МГГС (Швейцария, 1967).
137. Зуев В. Е., Ипполитов И. И., Макушкин Ю. С. Доклад на Международном симпозиуме по радиационным процессам в атмосфере. Норвегия, Берген, 1968.
138. Зуев В. Е., Марчук Г. И., Галин В. Я. Доклад на Международном симпозиуме по радиационным процессам в атмосфере. Норвегия, Берген, 1968.
139. Галибина Л. И., Зуев В. Е. Изв. вузов. Физика, № 4, 69, 1962.
140. Зуев В. Е., Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 4, 25, 1966.
141. Зуев В. Е., Несмелова Л. И., Сапожникова В. А., Творогов С. Д. В сб.: Актинометрия и оптика атмосферы. Наука, 1964.
142. Лугин Э. В., Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 3, 133, 1967.
143. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Кошелев Б. П. и др. Изв. вузов. Физика, № 3, 92, 1964.
144. Зуев В. Е., Кошелев Б. П., Творогов С. Д., Хмелевцов. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, 1, 509, 1965.

145. Зуев В. Е., Кошелев Б. П. Творогов С. Д., Хмелевцов С. С. Изв. вузов. Физика, № 3, 121, 1966.
146. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Савельев Б. А. ДАН, 175, 325, 1967.
147. Букатный В. И., Кабанов М. В., Кошелев Б. И. и др. Изв. вузов. Фзиика, № 8, 142, 1967.
148. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Пхагалов Ю. А. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, № 9, т. 1967.
149. Зуев В. Е., Соснин А. В., Хмелевцов С. С. Доклад на Международном симпозиуме по радиационным процессам в атмосфере. Норвегия, Берген, 1968.
150. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Боровой А. В. Изв. вузов. Физика, № 6, 163, 1963.
151. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Савельев Б. А. Изв. вузов. Физика, № 5, 80, 1964.
152. Кабанов М. В. Изв. вузов. Физика, № 8, 26, 1967.
153. Донченко В. А., Кабанов М. В., Савельев Б. А., Самохвалов И. В. Изв. вузов. Физика, № 1, 158, 1968.
154. Кабанов М. В., Савельев Б. А. Изв. вузов, сер. ФА и О, 3, 658, 1967.
155. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Самохвалов И. И. и др. Доклад на Международном симпозиуме по радиационным процессам в атмосфере. Норвегия, Берген, 1968.
156. Зуев В. Е., Лопасов В. П., Сончик В. К. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, № 3, 16, 1967.
157. Зуев В. Е., Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 2, 143, 1966.
158. Зуев В. Е., Соколов В. В., Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 3, 7, 1966.
159. Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 3, 147, 1965.
160. Творогов С. Д. Изв. вузов. Физика, № 3, 175, 1965.
161. Соколов В. В., Творогов С. Д. ЖПС, 8, 493, 1968.
162. Боровой А. Г. Изв. вузов. Физика, № 2, 175, 1966.
163. Боровой А. Г. Изв. вузов. Физика, № 6, 50, 1966.
164. Боровой А. Г. Изв. вузов. Физика, № 4, 97, 1967.
165. Боровой А. Г. Изв. вузов. Физика, № 5, 7, 1967.
166. Креков Г. М., Михайлов Г. А., Каргин Б. А. Изв. вузов. Физика, № 5, 54, 1968.
167. Креков Г. М., Михайлов Г. А., Каргин Б. А. Изв. вузов. Физика, № 4, 110, 1968.
168. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. — М.: Сов. радио, 1970.
169. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Сов. радио, 1977.
170. Кабанов М. В., Пхагалов Ю. А. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, 6, № 2, 1970.
171. Зуев В. Е., Кабанов М. В., Пхагалов Ю. А. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, 4, № 7, 1968.
172. Ведерникова Е. А., Кабанов М. В. Опт. и спектр., 37, № 1, 1974.
173. Ведерникова Е. А., Кабанов М. В., Крутиков В. А. Изв. вузов. Физика, № 3, 1976.
174. Генин В. Н., Кабанов М. В. Изв. вузов. Физика, № 5, 1972.
175. Генин В. Н., Кабанов М. В. Изв. вузов. Физика, № 7, 1973.
176. Донченко В. А., Кулаков Ю. И., Терентьев В. В. В сб.: Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск, 1977.

177. Донченко В. А., Кабанов М. В., Пальянов П. А. В сб.: Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Изд. ИОА СО АН СССР, 1977.
178. Донченко В. А., Кабанов М. В., Пальянов П. А. В сб.: Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Изд. ИОА СО АН СССР, 1977.
179. Донченко В. А., Землянов А. А., Кабанов М. В. и др. В сб.: I Всес. семинар по распростр. лазерного излучения в атмосфере. Изд. ИОА СО АН СССР, 1979.
180. Донченко В. А., Кулаков Ю. И., Петров В. П. V Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию. Изд. ИОА СО АН СССР, 1978.
181. Зуев В. Е., Лопасов В. П., Сончик В. К. Изв. АН СССР, Сер. ФА и О, 3, № 1, 1967.
182. Лопасов В. П., Сончик В. К., Чернявский Н. А. Тр. межвуз. совещ. по спектроскопии прозр. атм. Томск, 1968.
183. Зуев В. Е., Сончик В. К. Изв. АН СССР. Сер. ФА и О, 5, № 7, 1969.
184. Калиненко Д. И., Коханенко П. Н., Сончик В. К. Изв. вузов. Физика, № 6, 1974.
185. Калиненко Д. И., Коханенко П. Н., Сончик В. Н. Изв. вузов. Физика, № 10, 1974.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
В. Е. Панин, А. Д. Коротаев. Развитие физики твердого тела в Томском университете 6
А. П. Вяткин, В. И. Гаман, М. А. Кривов. Физика полупроводников и диэлектриков в Томском университете . . . 29
В. Н. Детинко. Исследования по радиоэлектронике в Томском университете 52
В. Н. Детинко, В. С. Семенов. Исследования в области электромагнетизма и электромагнитных методов контроля . . . 71
М. С. Бобровников, А. Г. Дмитренко. Радиофизические исследования в Томском университете 82
Н. А. Прилежаева, В. С. Мельченко, В. И. Данилова. Развитие исследований по оптике и спектроскопии в Томском университете . . . . . .

РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК
В ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Редактор **Е. С. Юзефович**
Технический редактор **Р. М. Подгорбунская**
Корректор **Г. В. Астапенко**

Сдано в набор 4/X-80 г. Подписано к печати 8/IV-81 г.
К306065 Формат $60\times90^{1}/_{16}$, бумага типографская № 2.
Гарнитура Литературная. Высокая печать.
П. л. 8; уч.-изд. л. 8,57. Тираж 500. Заказ 5287. Цена 1 р. 30 к.

Издательство ТГУ. 634029. Томск, ул. Никитина, 17.
Типография издательства «Красное знамя». Томск, ул. Советская, 47

1-437614

Томский госуниверситет 1878
Научная библиотека 00657496

Цена 1 руб. 30 коп.

1-437614