

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ, ПРОВЕДЕННЫЕ В ИРЭ АН СССР В 1979–1984 ГГ. <sup>1)</sup>

*В. А. Котельников, К. И. Палатов*

В настоящей статье отражены результаты исследований, выполненных в Институте радиотехники и электроники Академии наук СССР (ИРЭ АН СССР) в основном в 1979–1983 гг. Кроме того, в процессе подготовки статьи к изданию в нее были включены отдельные наиболее интересные результаты, полученные в 1984 г.

В 1979–1983 гг. в ИРЭ АН СССР выполнено большое количество фундаментальных и прикладных исследований, по результатам которых сделано более 1200 научных публикаций, получено 400 авторских свидетельств и 28 иностранных патентов. Эти исследования проводились главным образом по таким направлениям, как распространение радиоволн, статистическая радиофизика, радиоастрономия и исследования космического пространства, квантовая радиофизика, физика полупроводников и диэлектриков, физическая электроника, автоматизация научных исследований и др.

Ниже будет сделан краткий обзор полученных научных результатов.

## **I. Исследования распространения радиоволн**

*Исследования распространения радиоволн в атмосфере.* Эти исследования проводились в различных диапазонах волн, начиная от сверхнизкочастотного (СНЧ) и кончая оптическим.

Так, в СНЧ-диапазоне получено теоретическое решение задачи о прохождении волн через плоскоструйную магнитоактивную ионосферную плазму при различных углах падения волны и произвольной ориентации геомагнитного поля. При этом учтено движение молекул и ионов двух различных видов (например, кислорода и окиси азота). С распространением СНЧ были связаны исследования ионосферы, выполненные с помощью ИСЗ «Интеркосмос-Коперник 500». В ходе этих исследований изучалось спорадическое радиоизлучение Солнца

---

<sup>1)</sup> Из сб. Проблемы современной радиотехники и электроники. Под ред. В. А. Котельникова. М.: Наука, 1987 г. Сокращенный вариант.

и его следствие — морфологические и спектральные характеристики неоднородностей электронной концентрации ионосферы.

В УКВ-диапазоне теоретически исследованы статистические характеристики флуктуации частоты радиосигналов, распространяющихся в случайно-неоднородных средах со степенным спектром неоднородностей диэлектрической проницаемости при произвольном показателе степени. Эти исследования показали, что флуктуации частоты определяются, в основном, мелкомасштабной частью спектра турбулентных неоднородностей (в отличие от флуктуации фазы) в тропосфере, ионосфере, межпланетной плазме и т. п.

Для оценки условий распространения УКВ в пограничном слое атмосферы (высотой до 1 км) был разработан оригинальный метод, основанный на применении акустического локатора, т. е. на обратном рассеянии энергии звукового импульса турбулентными неоднородностями температуры и ветра. Экспериментальные исследования этого метода показали его пригодность как для прогнозирования условий распространения радиоволн, так и для изучения атмосферных процессов в пограничном слое атмосферы.

В ходе этих работ была создана динамическая теория коэффициента преломления пограничного слоя атмосферы Земли, позволяющая рассчитывать вариации высотных профилей коэффициента преломления в течение суток, их изменение по мере удаления от границы раздела суша–море, а также позволяющая ввести поправку к градиенту коэффициента преломления стандартной радиоатмосферы в приземном слое для учета влияния земной поверхности. Для более общего случая предложена трехмерная модель показателя преломления  $n$ , которая содержит средний экспоненциальный профиль, слоистые неоднородности и горизонтальные градиенты  $n$ , обусловленные циклонально-антициклональной структурой атмосферы. С учетом этой модели развит новый метод расчета рефракции в трехмерно-неоднородной атмосфере.

Новые результаты получены в исследованиях прохождения СВЧ-радиоволн через плазменные образования. В частности, была исследована динамика развития возмущений параметров плазмы (электронной температуры и плотности) в поле интенсивного СВЧ-пучка в условиях, когда скорость дрейфа плазмы через облучаемую область оказывается сравнимой со скоростью термодиффузии нагретой плазмы. При этом был обнаружен эффект развития НЧ-неустойчивости в движущейся плазме, подвергаемой локализованному СВЧ-нагреву. Данные исследования позволили определить основные эффекты взаимодействия интенсивных волн в условиях проведенных экспериментов: «просветление» плазмы и нелинейную рефракцию на начальной стадии развития возмущения, разрушение структуры пучка, интенсивное рассеяние на последующей стадии. Проведенное машинное моделирование указанных явлений, возникающих при прохождении мощных коротких электромагнитных импульсов, позволило, в частности, оценить оптимальные напряженности электрического поля в импульсе с точки зрения пере-

дачи СВЧ-энергии через газ в зависимости от давления и длительности импульса.

В ходе исследований условий распространения радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов выявлен ряд особенностей. Так, при изучении влияния осадков на распространение радиоволн в условиях Горьковской области (совместно с ИПФ АН СССР) получены годовые и сезонные распределения во времени вертикального ослабления в толще земной атмосферы на длине волны 8,2 мм, обусловленного газами и гидрометеорами. Из этих результатов следует, например, что летом максимальное ослабление в дождях достигает  $25 \pm 5$  дБ, но оно имеет место лишь в течение  $10^{-3}\%$  времени наблюдения (общее время наблюдения составляло 5500 ч). Зимой максимальное ослабление не превышало 2 дБ, причем этот максимум имел место только в  $10^{-2}\%$  времени наблюдения. В целом же значимость этих работ характеризуется тем, что они явились составной частью исследований, направленных на создание метода миллиметровой и субмиллиметровой спектроскопии. Авторы этого, метода и соответствующих исследований удостоены в 1980 г. Государственной премии СССР.

Ряд интересных данных получен и при исследовании условий распространения в атмосфере электромагнитных колебаний оптического диапазона. Так, с помощью специально созданной многочастотной лазерной установки (длины волн 10,6; 3,39; 1,15; 0,63 мкм) получено распределение размеров и концентраций водных частиц облаков и туманов в атмосфере. В диапазоне 13–17,6 мкм исследовано ослабление излучения в атмосфере, обусловленное поглощением в углекислом газе. При этом были получены коэффициенты поглощения с высоким разрешением по спектру ( $\Delta\nu = 0,24\text{--}0,32 \text{ см}^{-1}$ ). В этом же диапазоне была впервые зарегистрирована тонкая структура спектров молекул газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  при температурах 323 и 353 К с разрешением  $0,2 \text{ см}^{-1}$ . Была экспериментально исследована тепловая самодефокусировка непрерывного лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм в водном аэрозоле и показано, что при плотности излучения  $10 \text{ Вт/см}^2$  и начальной оптической толщине аэрозоля порядка единицы за счет самодефокусировки расходимость лазерного пучка увеличивается на  $10^{-3}$  рад.

Исследования расходимости и других параметров лазерного излучения потребовали создания уникальной измерительной аппаратуры. В частности, был разработан измеритель мощности на основе проходных решетчатых элементов со стекловолоконными датчиками.

*Исследование волноведущих и антенных систем.* Существенным результатом исследований в этом направлении является создание газонаполненных металлодиэлектрических волноводов, в нерабочем положении (без газонаполнения) наматываемых на барабан. Волноводы созданы в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн вплоть до волн длиной 2 мм с потерями, близкими к потерям аналогичных

металлических волноводов, но с весом менее 100 г/м. Реализованная технологическая длина отдельных секций, наматываемых на барабан, ~ 150 м. Данные волноводы запатентованы за рубежом и получили уже частичное применение в отечественной радиотехнике.

В исследованиях ИРЭ показано, что металлические, диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы могут найти применение и для направленной передачи энергии ИК-диапазона ( $\lambda > 4$  мкм). Это оказалось возможным благодаря высокому коэффициенту отражения волн ИК-диапазона от диэлектриков и металлов при скользящем падении волн на стенки волноводов, диаметры которых много больше длины волны. Экспериментальное исследование на  $\lambda = 10,6$  мкм показало, что потери ИК-излучения в металлодиэлектрических волноводах могут не превышать 0,3–0,6 дБ/м.

Интересные результаты были получены в области теории антенн. В ИРЭ АН СССР разработана теория синтеза двухзеркальных антенн, позволяющая реализовать заданную диаграмму направленности малым зеркалом сложной формы при большом зеркале простой формы. В случае оптимального выбора формы обоих зеркал обеспечивается минимальный уровень боковых лепестков при заданной диаграмме главного лепестка. Таким образом впервые синтезирована двухзеркальная антенна, формирующая косекансную диаграмму в одной плоскости и остронаправленную — в другой (перпендикулярной) плоскости с малым зеркалом двойной кривизны и параболическим большим зеркалом. Такие антенны открывают возможность создания эффективных антенных систем с большим главным зеркалом для миллиметрового диапазона волн.

В более общем случае на основе развитой в ИРЭ теории незатухающих собственных электромагнитных колебаний в бесконечной области был предложен новый тип антенны, излучающая поверхность которой замкнутая (например, слабопрозрачный резонатор). Форма ее выбрана соответственно с заданной диаграммой направленности. Это позволяет гладкими токами реализовать безлепестковые диаграммы. Модельный эксперимент, выполненный с такой резонансной антенной, в которой требующийся ток создается при возбуждении в резонаторе собственных колебаний, показал, что на уровне –35 дБ в диаграмме лепестки отсутствуют. Исследованиями установлено, что на этом же принципе можно создать широкополосные низкодобротные антенны и волноводные преобразователи поля. В перспективе антенны и волноводные преобразователи этого типа могут быть объединены с электронными приборами.

Исследования по вышеуказанным направлениям повлекли за собой решения целого ряда других задач.

В области усовершенствования технологических методов производства световодов можно отметить следующие результаты.

В 1979 г. ИРЭ совместно с промышленными организациями созданы образцы световодного кабеля на основе кварц-полимерных светово-

дов с апертурой 0,4–0,56, потерями 10–50 дБ/км, средней прочностью на разрыв 400 кг/мм<sup>2</sup> и морозостойкостью до –40° С.

В этом же году разработана, изготовлена и запущена в систематическую эксплуатацию автоматизированная система получения заготовок световодов типа «Градан» (с градиентной зависимостью диэлектрической проницаемости в сечении световода). С помощью данной системы получены образцы одномодовых световодов с потерями ~ 18 дБ/км на длине волны 0,63 мкм и 2–3 дБ/км на длине волны 1,15 мкм. Разработана технология получения высокоапертурных волокон типа кварц–полимер с повышенной морозостойкостью. Полученное по разработанной технологии волокно при апертуре 0,39 морозостойко до –55°.

В 1980 г. на основе улучшения технологии производства кварцевых световодов с помощью автоматических установок получены одномодовые световоды с потерями < 2 дБ/км на  $\lambda = 0,85$  мкм, предназначенные для использования в датчиках различного типа.

Разработана технология изготовления ступенчатых световодов с фигурной формой жилы (прямоугольник, треугольник, эллипсо-образное сечение и др.), позволяющая получать такие световоды с потерями 8 дБ/км и дисперсией импульса 7 нс/км. На основе изучения кинетики осаждения окисных слоев за счет комбинированного легирования и обработки заготовок впервые в мировой практике получены кварцевые световоды с апертурой 0,4 при диаметре жилы 120 мкм и температурном диапазоне –60 ÷ +150° С.

В 1981 г. разработан метод контроля неконцентричности и изменений толщины полимерных покрытий вдоль кварцевого волокна в процессе вытяжки, а также метод неразрушающего контроля показателей преломления и диаметров оболочек в кварцевых заготовках.

В результате теоретического анализа многослойных структур предложены новые методы увеличения апертуры и надежности оптических волокон (нанесение наружного металлического покрытия, выбор концентрации легирующих добавок по сечению волокна и величины вытягивающего усилия при производстве волокна и др.).

Разработаны технология изготовления одномодовых световодов с потерями ~ 5 дБ/км на длине волны 0,76 мкм, сохраняющих поляризацию волны за счет создания фигурной светоотражающей оболочки, и методика лазерной сварки одномодовых оптических волокон с потерями на одно соединение не хуже 0,6 дБ (на  $\lambda = 0,63$  мкм), а также ряд способов контроля параметров световодов.

В 1982 г. разработана методика вытяжки цилиндрических стержней из сверхчистого силикатного стекла с поверхности расплава и получены световоды типа стекло–полимер с потерями 50 дБ/км при апертуре 0,56. Разработана также лабораторная технология градиентных волоконных световодов с потерями 3–50 дБ/км и полосой 400–500 МГц/км в диапазоне волн 0,85–1,3 мкм.

В этом же году разработан кварцевый световод, позволяющий передавать оптическую мощность порядка 100 Вт по одиночному световоду, предназначенный для хирургических воздействий в медицинской практике.

В 1983 г. проводилось дальнейшее совершенствование технологии вытяжки световодов и изготовления кабелей, пригодных для широкого практического применения, а также были выполнены исследовательские работы по созданию метрики световодного производства и световодных датчиков различных физических величин. Большое внимание было обращено также на создание световодных систем связи.

## II. Исследования в области статистической радиофизики

*Исследования естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне ОНЧ.* В 1979–1983 гг. продолжались исследования в области накопления статистических данных о грозовых помехах и методах селекции сигналов в условиях наличия таких помех. В частности, получены следующие научные результаты.

Установлена практически одинаковая частотная зависимость спектральной плотности энергии естественных шумовых флуктуаций электромагнитного поля Земли на частотах от долей герца до нескольких килогерц. Спектральная плотность оказалась в среднем величиной, обратно пропорциональной частоте в степени 1,6.

Теоретически решена задача о связи грозовой активности с параметрами атмосферных ОНЧ-радиопомех в точке их приема, что дает возможность прогнозировать характеристики этих помех для любой области земной поверхности в любое время. Полученная территориально-временная модель радиопомех охватывает диапазон частот от 0,03 до 30 кГц и включает физическое обоснование, математическое описание и алгоритмическое оформление процедур расчета плотности спектра вертикальной составляющей поля помех в любой произвольной области земного шара в любой сезон в течение суточного цикла с разрешающим временем 1 ч при заданных вероятностных показателях. Контрольные эксперименты подтвердили справедливость теории.

Развита теория подавления атмосферных помех на случай многопунктового приема и показано, что из-за отличия пространственной структуры полей помех и сигналов при двух- и трехпунктовых приемах по сравнению с однопунктовым достигается увеличение отношения сигнала к помехе по энергии на 1–3 порядка.

На основании анализа экспериментально полученных интервалов времени между соседними импульсами помех, исследованных на территории СССР и некоторых других территориях Земли, установлен единый характер временной структуры поля помех и разработано его

аналитическое описание, применимое для инженерных расчетов влияния помех на прием полезных сигналов.

*Исследования СВЧ-излучения земной поверхности.* Данное направление исследований включало изучение земных покровов и акваторий аппаратурой, устанавливавшейся как на ИСЗ, так и на самолетах. В частности, со спутника «Космос-1076» были проведены измерения радиотеплового излучения Земли на длинах волн 0,8; 1,35; 3,2 и 8 см и получены вдоль его орбиты значения температуры поверхности океана, полной массы водяного пара, водозапаса облаков и др.

Параметры атмосферы и поверхности океана были уточнены в ходе эксперимента по радиофизическому зондированию океана со спутника «Космос-1151», на котором была установлена радиометрическая аппаратура, сочетающая измерения как спектральные в диапазоне 0,8–8 см, так и поляризационные в диапазоне 3,2 см. Проведенная автоматизация обработки данных эксперимента позволила в ходе дистанционных измерений непосредственно получать изучаемые параметры и сравнивать их с данными корабельных измерений, гидрологических картами и картами нефанализа. В данном случае было показано хорошее согласие данных, получаемых при всех сопоставлениях. На основе полученных в этих экспериментах результатов создан банк данных космической радиометрической информации, позволяющий быстро получать значения интенсивности уходящего СВЧ-излучения Земли для заданных участков траекторий полета спутника.

В работах ИРЭ за указанный период был обобщен многолетний опыт (советский и зарубежный) по использованию дистанционных радиофизических методов для исследования окружающей среды с космических аппаратов. На основании этого обобщения определен круг народнохозяйственных и научных задач, которые целесообразно решать с помощью этих методов, а также определен состав аппаратуры и методики измерений как для многоцелевых, так и для специализированных космических комплексов.

В 1979–1983 гг. получили дальнейшее развитие самолетные радиометрические и радиолокационные исследования покровов Земли. Так, на основе результатов самолетных экспериментов 1978–1979 гг. с помощью радиолокационной станции бокового обзора с синтезированной апертурой исследовано качественно и количественно явление расфокусировки изображения морских волн в зависимости от фазовой скорости морских волн и направления их распространения.

Развитие исследований по дистанционной СВЧ-радиометрии происходило по следующим направлениям.

*А. Создание научных и практических основ применения данного метода для определения влажности почв в интересах сельскохозяйственного производства и эффективного использования систем мелиорации.* В результате исследований были созданы образцы влагомеров, позволяющие производить экспрессные измерения влажности в диапазоне содержания воды в почве от 0 до 1 г/см<sup>3</sup> с относительной

погрешностью  $\sim 4\%$  и производительностью  $\sim 1000\text{--}1500$  га/ч. Авторы этой работы удостоены в 1983 г. Государственной премии.

*Б. Получение взаимосвязи характеристик поля СВЧ-излучения с уровнем грунтовых вод.* Исследованиями установлена эта взаимосвязь в интервале от 0 до 3 м в различных почвенно-климатических зонах СССР (от аридных зон Туркмении до гумидных районов Прибалтики). В прикладном плане ИРЭ создал аттестованную радиометрическую аппаратуру для определения уровня залегания грунтовых вод с точностью 50–70 см.

*В. Изучение морской поверхности и ледовых покровов.* Исследования в этом направлении позволили, в частности, установить перспективность совместного использования средств активного и пассивного зондирования геофизических сред, в том числе для определения возрастных характеристик льда и стадии развития морского волнения.

*Г. Изучение радиоконтрастов различных покровов для целей навигации.* С помощью летающей на самолете ИЛ-18 лаборатории и наземных измерительных комплексов в диапазоне 0,8–27 см исследованы радиоконтрасты различных покровов и металлических поверхностей относительно растительного покрова (лес, луг) при различных погодных условиях при наблюдении в надир. При этом установлено, например, что контрасты металлических и водных поверхностей уменьшаются в случае дождя и полностью исчезают при его интенсивности 25–30 мм/ч.

*Исследование стохастических процессов в радиофизических системах.* В ИРЭ АН СССР обнаружено и исследовано явление стохастизации колебаний в автогенераторах с запаздыванием, возникающее не за счет воздействия начальных флуктуации, а за счет развития нелинейной стохастической неустойчивости. На основе этого явления предложены и исследованы электронно-волновые и радиотехнические модели генераторов с управляемой шириной спектра и реализованы шумоподобные сигналы, характеризующиеся быстрым спаданием автокорреляционных функций и образованием сплошного и достаточно равномерного энергетического спектра.

### **III. Радиоастрономия и исследования космического пространства**

В 1979–1983 гг. в ИРЭ были продолжены радиофизические исследования физических параметров планет и межпланетной среды с помощью космических аппаратов «Венера-11, -12» и радиолокации планет, а также завершалась обработка данных, полученных с помощью космических аппаратов «Венера-9, -10» и более ранних космических экспериментов.

В 1983 г. был также начат уникальный эксперимент по исследованию физических условий на поверхности Венеры с помощью космических аппаратов «Венера-15, -16».

Наиболее важным результатом этих исследований явилось завершение работ по созданию единой релятивистской теории движения внутренних планет Солнечной системы, выполненных ИРЭ совместно с ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, ИТА АН СССР и ГАО АН СССР. Новая теория дает возможность прогнозировать взаимное расположение Солнца и планет Меркурий, Венера, Земля, Марс с точностью, лучшей 10–15 км, что на два порядка точнее прогноза по классическим теориям. Создание новой высокоточной теории движения внутренних планет является значительным фундаментальным вкладом в изучение динамики Солнечной системы и имеет важное прикладное значение в космонавтике для баллистического обеспечения полетов межпланетных станций. Цикл работ в этом направлении удостоен Государственной премии СССР за 1982 г.

Исследования Венеры с помощью космических аппаратов «Венера-15, -16» позволили получить радиолокационные изображения рельефа и параметры физического состояния большого участка поверхности планеты.

Из других результатов исследований космического пространства наиболее значимыми являются следующие.

*Изучение солнечной плазмы.* Экспериментально определены значения скорости солнечного ветра в широком диапазоне радиальных расстояний (2–100 радиусов Солнца): при удалении на 2 радиуса Солнца скорость составляет 30 км/с, на 7 радиусов — 60 км/с, на 20 радиусов — 300 км/с и при удалениях до 50–100 радиусов Солнца скорость ветра имеет величину 400–500 км/с. Эти данные подтвердили современные теоретические представления в этом вопросе.

Экспериментально установлено регулярное смещение частоты дециметровых радиоволн при прохождении их через корону Солнца. Этот эффект объяснен движением лучевой линии вдоль градиента электронной концентрации и характеризуется тем, что на участке сближения лучевой линии с Солнцем наблюдается увеличение частоты радиосигналов на величину около 10 Гц, а на участке выхода из-за Солнца происходит соответствующее уменьшение частоты. Изучение этого явления позволило объяснить регулярные ошибки баллистических данных аппаратов «Венера». На основе анализа частотного сдвига развита новая методика определения электронной концентрации и определены ее значения в короне Солнца. В частности, при гелиоцентрических расстояниях 2,3 и 3,3 радиуса Солнца она составляет  $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  и  $4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

Установлено, что спектральная плотность вариаций интегральной электронной концентрации в диапазоне  $10^{-2}$ –1 Гц увеличивается с приближением к Солнцу. При этом наблюдается уменьшение средне-

го значения спектрального индекса пространственного спектра флуктуации электронной концентрации.

Определены размеры самых малых неоднородностей, которые присутствуют в спектре турбулентности, они увеличиваются с удалением от Солнца из-за затухания мелкомасштабных вихрей; эти неоднородности на расстояниях от Солнца  $\sim 4$  млн км имеют размеры  $\sim 2$  км, а на расстояниях свыше 14 млн км — более 15 км.

*Изучение внутренних планет Солнечной системы.* Проведены радиолокационные исследования планет Меркурия, Марса и Венеры с помощью усовершенствованного планетного радиолокатора (с антенной  $\varnothing 70$  м), в ходе которых сделано следующее:

- выполнены высокоточные измерения расстояния и скорости движения Меркурия в интервале дальности 100–140 млн км. расстояние измерялось с точностью до 1 км, скорость — до 5 см/с. Исследованиями обнаружено, что отклонения измеренных расстояний от их значений, вычисленных по классической теории движения Меркурия, составили 120–420 км;

- проведены измерения расстояний до Марса с точностью 0,6–1,5 км в интервале дальности 100–135 млн км вдоль всей его 21 параллели северной широты. В результате измерений впервые радиолокационным способом получены профили высот поверхности Марса по северному склону горы Олимп и измерена ее максимальная высота, равная  $17,5 \pm 1,5$  км;

- при радиолокации Венеры на дальностях 96–161 млн. км измерен профиль высот в экваториальной (ранее не исследовавшейся) области поверхности Венеры в интервале долгот 85–225° на трассе протяженностью около 14 тыс. км, проходящей через две горные области, максимальная высота первой на долготе 90° составила около 4 км, второй — долготе 200° — около 2,5 км.

Исследованиями с помощью космических аппаратов, запускавшихся к планете Венера (в том числе проведенной обработкой результатов, полученных при ранее проведенном запуске аппаратов «Венера-9, -10») осуществлено следующее:

- получено распределение отражательной способности трех ранее не исследованных районов планеты (от  $-29,5$  до  $-28,0^\circ$  по широте и от  $155$  до  $165^\circ$  по долготе; от  $-28,5$  до  $-26,5^\circ$  по широте и от  $165$  до  $174^\circ$  по долготе, а также от  $-24,5$  до  $-22^\circ$  по широте и от  $220$  до  $235^\circ$  по долготе по планетоцентрической системе координат). Полученные данные свидетельствуют о равнинном характере рельефа этих районов и только в районе вдоль широты  $-28,6^\circ$  в интервале долгот от  $157$  до  $164^\circ$  в полосе 30–50 км наблюдаются перепады высот, превышающие 2 км;

- на основе изучения интенсивности частотных и фазовых флуктуации дециметровых радиоволн при распространении в атмосфере Венеры получен ряд данных, характеризующих физическое состояние

атмосферы Венеры. В частности, определен внешний масштаб турбулентностей атмосферы, составляющий 4–6 км, и подтверждено то, что верхняя область повышенной турбулентности атмосферы занимает высоты 65–70 км. По полученным экспериментальным данным разработана модель «радиоатмосферы» Венеры, описывающая зависимость коэффициента преломления радиоволн в интервале высот 0–90 км над поверхностью планеты. Модель с высокой точностью дает сведения о коэффициенте преломления для ночной атмосферы Венеры. Для интервала высот 0–50 км она справедлива и для дневной атмосферы планеты;

— показано, на основе изучения высотных профилей вертикального градиента электронной концентрации в ионосфере Венеры ( $dN_e/dh$ ), что этот градиент достигает в дневной ионосфере планеты наибольшего значения в области, которая находится ниже главного максимума электронной концентрации на высоте 130–137 км и изменяется в пределах  $2,2 \cdot 10^4$ – $3,2 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>·км<sup>-1</sup> в зависимости от зенитного угла Солнца. Двухчастотное радиопросвечивание ионосферы Венеры позволило построить модель образования дневной ионосферы этой планеты, учитывающей фотохимические и диффузионные процессы и объясняющей основные особенности высотных профилей электронной концентрации от нижней границы ионосферы (~ 120 км) до ионопаузы, а именно: слабую зависимость высот главного и нижнего максимумов ионизации от условий освещенности, увеличение концентрации электронов с приближением к экватору, появление верхнего максимума ионизации, быстрый спад электронной концентрации в области диффузионного равновесия при малых зенитных углах и наличие протяженной области с почти постоянной концентрацией электронов при больших зенитных углах Солнца.

#### IV. Физическая электроника

В 1979–1983 гг. исследования по этой проблеме были сосредоточены в основном в областях эмиссионной, сверхпроводниковой и СВЧ-электроники.

Остановимся на важнейших результатах этих исследований.

*Эмиссионная электроника.* Наибольшее развитие в этой области получили исследования, направленные на создание эмиттеров с отрицательным электронным средством (ОЭС). В частности, в ИРЭ была разработана методика изготовления эффективных фотокатодов с ОЭС на основе полупроводниковых твердых растворов InGaAsP с квантовым выходом до 4% на длине волны 1,06 мкм. Исследования показали, что оптимальным для названного фотокатода является твердый раствор  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ , в котором  $x = 0,09 - 0,11$ ;  $y = 0,24 - 0,31$ ; запрещенная зона в такой системе равна 1,15–1,16 эВ. В то же время на квантовый выход таких фотокатодов существенно влияют рекомбинационные процессы. Поэтому для создания эффективных фотокатодов

необходимо использовать совершенные эпитаксиальные пленки, обладающие малой скоростью поверхностной рекомбинации. Обнаружено, что кислород в активирующем покрытии Cs–O на поверхности таких фотокатодов находится в двух различных химических состояниях. Часть кислорода связана с поверхностью полупроводника, а часть с цезием. В процессе деградации фотокатодов часть кислорода, связанного с цезием, переходит в другое химическое состояние, соответствующее связи кислорода с полупроводником.

Ряд новых результатов получен в области создания более эффективных эмиттеров электронов.

Разработан композиционный катодный узел, состоящий из термоэлектронного катода (оксидного) и прострельного эмиттера из пористого слоя MgO, обеспечивающего усиление тока термоэлектронной эмиссии с оксидного катода благодаря явлению прострельной вторичной электронной эмиссии, усиленной полем. Такой катод позволяет получать ток, превосходящий ток с обычного оксидного катода в 10–15 раз в импульсном режиме и в 3–5 раз в статическом режиме. Тем самым композиционный катодный узел позволяет получать электронный ток той же величины, что и с обычного оксидного катода при значительно более низких температурах (на 100–150° ниже обычных).

Создан ненакаливаемый катод на основе алюмосиликатных соединений щелочных металлов (цезий и др.). Такой катод обеспечивает импульсный отбор электронного тока плотностью в десятки и сотни миллиампер с 1 см<sup>2</sup> поверхности (при абсолютном значении тока в несколько миллиампер) при комнатной температуре. Напряженность электрического поля, требуемая для эмиссии, составляет 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> В/см. Такие катоды обладают сроком службы не менее 100 ч и обладают большими преимуществами при использовании в лампах-вспышках для фотосъемки.

Показана возможность создания эмиттеров прострельного типа из окиси магния с усиленной полем вторичной электронной эмиссией при коэффициенте вторичной эмиссии 8–10. Этот коэффициент практически не зависит от тока до плотностей тока первичного луча ~ 10 мА/см<sup>2</sup> при длительности импульса в десятки микросекунд.

При длительности импульса в несколько наносекунд были получены выходные токи порядка 1 А/см<sup>2</sup> при коэффициенте вторичной эмиссии ~ 6. Этот результат открывает возможность использования эмиттеров такого типа в новых гибридных акустоэлектронно-лучевых приборах, предназначенных для обработки и запоминания радиосигналов.

*Сверхпроводниковая электроника.* В истекшем пятилетии завершен цикл исследований нестационарных и неравновесных явлений в сверхпроводниках. В результате исследований показано:

— возникновение эффективных нелинейных взаимодействий СВЧ-колебаний в широких сверхпроводящих пленках с существенно неравномерным распределением плотности тока по сечению обусловлено образованием и движением в них вихревой структуры;

— явление стимулирования сверхпроводимости электромагнитным излучением вызывается неравновесным распределением квазичастиц по энергиям;

— в неоднородных сверхпроводящих системах — на границах сверхпроводник–нормальный металл, электрическое поле проникает в сверхпроводник на макроскопические расстояния; этот эффект вместе с эффектом квантово-механического (андреевского) отражения определяет вклад сверхпроводника в полное сопротивление системы сверхпроводник–нормальный металл.

В выполненном цикле работ исследован нестационарный эффект Джозефсона в слабосвязанных сверхпроводниках и действие на них электромагнитных излучений в диапазоне от миллиметровых волн до  $\lambda \sim 10$  мкм.

На основе выполненных исследований созданы высокочувствительные широкополосные детекторные устройства миллиметрового и субмиллиметрового излучений с предельной чувствительностью  $1 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и флуктуационной температурной чувствительностью не хуже 0,01 К/Гц<sup>1/2</sup>. Кроме того, был создан супергетеродинный приемник на эффекте Джозефсона с полосой 200 МГц на длине волны 2 мм, обладающий флуктуационной чувствительностью 0,12 К.

В результате исследования сверхпроводниковых переходов в качестве активных элементов СВЧ-устройств были обнаружены и объяснены особенности преобразования частоты миллиметрового диапазона в СВЧ-диапазоны в джозефсоновских переходах, а также построена теория взаимной синхронизации в многоконтактных джозефсоновских структурах. На основе этих результатов построена обобщенная модель джозефсоновского преобразования частоты для произвольного соотношения частот сигнала и гетеродина, а также получены оценки оптимальных параметров СВЧ приемных устройств, состоящих из цепочки последовательно включенных джозефсоновских переходов.

В последнее время исследования в данном направлении показали, что в джозефсоновских переходах с локальными неоднородностями существуют устойчивые локализованные состояния солитонов. Изменением магнитного внешнего поля можно управлять этими состояниями, скачком изменяя энергию перехода. Подобные переходы можно использовать в качестве новых быстродействующих элементов для переключения и запоминания информации с малой потребляемой энергией.

*СВЧ-электроника.* В 1979–1983 гг. исследования в данном направлении велись по вопросам релятивистской электроники, использованию центробежно-электростатической фокусировки (ЦЭФ) электронов в управляющих сильноточных системах, а также в области воздействия

СВЧ-излучений на различные объекты. Основными результатами этих исследований являются следующие.

В области релятивистской электроники:

— совместно с Минским РТИ предложены и проанализированы новые высокоэффективные механизмы взаимодействия релятивистских электронных потоков с электромагнитными полями СВЧ. Машинный эксперимент показал возможность получения на таких устройствах КПД  $\sim 90\%$ . Таким же высоким КПД должен обладать предложенный и исследованный новый тип прибора на релятивистских электронах — гирокон с магнитным полем, модулятором и отбирателем мощности на вращающихся полях типа  $E_{110}$ . В отличие от классических гироконов в предложенном приборе нет критической зависимости электрических параметров от напряженности магнитного поля и формы электронного потока, что значительно облегчает задачу создания приборов на более коротких длинах волн;

— совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова и Институтом сильноточной электроники СО АН СССР показана возможность создания синхронных и синхротронных генераторов с выводом энергии из квазиоптического резонатора в виде пучка электромагнитных волн с узкой диаграммой направленности, а также осуществлена экспериментальная реализация многоволнового генератора, позволившая получить значение мощности когерентного излучения порядка нескольких гектоватт в 3-сантиметровом диапазоне длин волн с КПД около 20%.

В области использования ЦЭФ проведена оптимизация комплекса параметров электронно-лучевых коммутирующих приборов, в которых применена ЦЭФ, сильноточность, высоковольтность, управляемость, равномерность токоотбора с катода и т. д. Это открывает возможность достигать в таких приборах величины коммутируемого напряжения 750 кВ при сохранении величины рабочего тока и величин управляющих напряжений, составляющих несколько процентов от рабочего. Работы по дальнейшему совершенствованию таких приборов продолжаются совместно с промышленными организациями.

В области воздействия СВЧ-излучений на различные среды:

— выявлены основные нелинейные эффекты воздействия СВЧ-волн на плазму, а также условия и результаты их самовоздействия (просветление плазмы, самофокусировка, нелинейная рефракция СВЧ-волн). При этом экспериментально показана возможность возникновения СВЧ-разряда в поле пучка микроволн при напряженностях поля меньше пробойных при наличии предварительной ионизации газовой среды;

— получен ряд новых результатов при исследовании воздействия СВЧ-излучений на биологические объекты. В частности, впервые обнаружен нетепловой эффект стимуляции ионного транспорта и транспорта воды в биологических мембранах при воздействии одиночными СВЧ-импульсами в сантиметровом диапазоне длин волн с пиковой мощностью 30 МВт и длительностью  $\sim 15$  нс (при таких значениях мощности и длительности импульса нагрев облучаемых образцов

в среднем не превышает  $0,01^\circ \text{C}$ ). В экспериментах было обнаружено также изменение ионной проницаемости клеточных и искусственных биологических мембран под действием непрерывного миллиметрового излучения нетепловой интенсивности ( $\sim 1 \text{ мВт/см}^2$ ). Таким образом, можно утверждать, что обнаруженный эффект и проведенные исследования открывают новые возможности управления механизмами жизнедеятельности клеток и биологических внутриклеточных структур;

— теоретически показано, что в широком диапазоне частот (от субмиллиметровых до сантиметровых волн) поглощение излучения полярными жидкостями обусловлено механизмом квазирезонансного взаимодействия либрации молекул с полем излучения. Развитая теория позволяет объяснить особенности частотных и температурных зависимостей поглощения излучения, а также уточнить молекулярные модели конденсированных полярных сред.

## **V. Физика твердого тела**

В 1979–1983 гг. исследовательские работы ИРЭ по физике твердого тела развивались в основном по направлениям:

- физика полупроводников и диэлектриков,
- акустоэлектроника и акустооптика,
- физика магнитных явлений,
- кристаллофизика.

Наиболее значимыми результатами являются следующие.

*Физика полупроводников и диэлектриков.* В 1979–1983 гг. были получены новые результаты в области исследования электронных и фотоэлектрических явлений в полупроводниках. В частности, в области исследования электронных явлений выявлен ряд новых эффектов и закономерностей:

— обнаружен и экспериментально исследован новый тип электрической неустойчивости в биполярной плазме антимида индия при гелиевых температурах, приводящий к возбуждению колебаний тока при полях порядка  $1 \text{ В/см}$  и частотах порядка обратного времени релаксации энергии электронов (до  $1 \text{ ГГц}$ );

— выяснены природа и особенности ранее обнаруженного явления двухчастотной генерации в образцах арсенида галлия с движущимися доменами сильного поля. Явление заключается в генерации (помимо пролетной частоты) колебаний с частотой, существенно выше пролетной (миллиметрового диапазона), вследствие наличия в образце с движущимся доменом высокочастотной отрицательной проводимости;

— в размерно-квантованных пленках полуметаллов и вырожденных полупроводников методами туннельной спектроскопии и магнитооптики при квантующих магнитных полях определены площади сечений изоэнергетических поверхностей, в том числе далеких от поверхности Ферми. На основе исследований предложены новые электронные при-

боры — гетероструктуры на основе одного материала, перестраиваемые приемники далекого ИК- и субмиллиметрового диапазонов;

— теоретически предсказаны новые высокочастотные эффекты в полупроводниках при резко анизотропной функции распределения электронов: геликоны и их неустойчивость, поглощение электромагнитного излучения при различном расположении векторов высокочастотного поля, скорости дрейфа электронов и направления распространения волны, неустойчивость иглообразного распределения электронов в поперечном магнитном поле;

— на основе машинных экспериментов обнаружены неизвестные ранее типы периодических и непериодических устойчивых расслоений автоволновых сред, которые могут быть использованы для записи картинной информации с ее одновременной частичной обработкой. Из ряда предложенных моделей твердотельных автоволновых сред впервые экспериментально реализована двумерная распределенная тепловая автоволновая среда, позволяющая визуализировать и изучать распространение и взаимодействие нелинейных триггерных волн. В исследованиях автоволновых сред обнаружены термооптические волны переключения в полистабильной распределенной автоволновой среде в структурах типа нелинейного интерферометра Фабри–Перо; машинным экспериментом обнаружены новые механизмы самоорганизации автоволновых сред — самодостройка структур по фрагментам в исходно-изотропной устойчивой однородной среде и в анизотропной колебательной среде; выявлена способность автоволновых сред выделять пространственные сигналы на фоне интенсивных динамических шумов;

— разработан новый метод исследований пограничных состояний в гетеропереходах, основанный на заряде исследуемой структуры при заданном напряжении и последующем измерении стекающего заряда, в частности, в условиях подсветки. Метод существенно расширяет возможности исследования гетеропереходов, позволяя измерять их зарядовые характеристики с собственной постоянной времени больше или порядка  $10^{-4}$  с;

— теоретически установлено, что в квазиодномерных кристаллах с соизмеримой волной зарядовой плотности должен наблюдаться эффект, аналогичный нестационарному эффекту Джозефсона. Этот эффект может наблюдаться не только при низких температурах, так как не связан со сверхпроводимостью. Экспериментально исследованы электрофизические свойства квазиодномерных кристаллов  $\text{TaS}_3$  в области температур 4,2–300 К и электрических полей до 500 В/см, а также их частотная зависимость. Установлено существование температурных областей электропроводности с различными энергиями активации. Получены вольт-амперные характеристики образцов  $\text{TaS}_3$  и обнаружено существенное увеличение электропроводности при достижении порогового значения электрического поля. Температурная зависимость порогового поля определена в пределах 4,2–300 К. Показано, что при низких температурах в данном материале преобладает прыжковая

проводимость с переменной длиной прыжков. Найдено, что величина диэлектрической постоянной достигает гигантских значений —  $10^7$ . Получено спектральное распределение отклика орторомбического  $\text{TaS}_3$  и показано существование края фундаментального поглощения при энергиях, соответствующих пайерлсовской щели, а также узкой линии поглощения в центре щели. Наблюдаемые эффекты объясняются возникновением в  $\text{TaS}_3$  при понижении температуры волны зарядовой плотности, неподвижной в слабом электрическом поле и движущейся в сильном, а также нелинейными возбуждениями в ней — солитонами. Теоретически предсказано и экспериментально обнаружено, что, вопреки распространенному представлению, движение волны зарядовой плотности в квазиодномерных материалах дает вклад в холловскую ЭДС. На основании проведенных исследований предложен простой болометрический приемник излучения с высокой чувствительностью (1000 В/Вт) и малыми размерами;

— обнаружена аномально высокая тензочувствительность МДП-структур с туннельно-тонким диэлектриком, на два порядка превышающая тензочувствительность диодов Шоттки и на три-четыре порядка тензочувствительность  $p-n$ -переходов. Эффект объясняется характерным для этой структуры усилением потока основных носителей за счет накопления неосновных носителей тока (дырок) у границы раздела тонкий диэлектрик–полупроводник;

— предложена и реализована оригинальная система полупроводниковой энергонезависимой памяти как однократного (ППЗУ), так и многократного действия (РПЗУ), превосходящие по своим параметрам (напряжения питания, надежность хранения, время считывания и др.) существующие системы памяти;

— предложена эффективная архитектура для реализации поисковых алгоритмов (предназначенных для решения неформализуемых задач) на основе быстродействующей оптоэлектронной элементной базы.

Кроме того, на основании выполненных в ИРЭ исследований в 1979–1983 гг. был разработан ряд полупроводниковых приборов и измерительных методов, имеющих практическую значимость.

Предложено использовать для генерации СВЧ-колебаний распределенные полупроводниковые структуры, являющиеся одновременно элементом с отрицательной дифференциальной проводимостью и резонатором. Экспериментально реализовано самовозбуждение кольцевых резонансных структур из арсенида галлия на частоте 54 ГГц с выходной мощностью порядка 1 мВт.

Создан полупроводниковый малогабаритный источник излучения 2-миллиметрового диапазона с мощностью на выходе порядка 150 мкВт, включающий в себя в виде единой конструкции генератор накачки 4-миллиметрового диапазона на диоде Ганна и умножитель частоты на диоде с барьером Шоттки.

Разработаны конструкции и созданы образцы детекторов для диапазона длин волны 0,4–2 мм на диодах с барьером Шоттки из

арсенида галлия. Вольт-ваттная чувствительность детекторов в 2-миллиметровом диапазоне не хуже  $10^3$  В/Вт при предельной чувствительности  $5 \cdot 10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Предложена новая конструкция и методика изготовления диодов Ганна в виде сотовых структур и созданы образцы структур с диаметрами активного элемента 7 и 20 мкм. Показана возможность генерации с их помощью излучения в 4-миллиметровом диапазоне длин волн, а также детектирования и преобразования частоты в 4- и 2-миллиметровом диапазонах волн.

Установлена возможность эффективного применения в генераторах миллиметрового диапазона волн (4–8 мм) высокочастотного квазиоптического резонатора в качестве опорного для улучшения частотной стабильности и сужения спектра автоколебаний на диоде Ганна в резонансно-пролетных и гармонических режимах работы диода.

Разработан метод и аппаратура для определения пространственного распределения примесей в кремнии, основанные на изучении спектров поглощения экситон-примесных комплексов в магнитном поле.

Разработан новый автоматический эллипсометр со спектральным диапазоном 0,63–10,6 мкм, дающий возможность проведения измерений на микроучастках образцов до  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>; по своим параметрам данный эллипсометр превосходит зарубежные аналоги.

Ряд дополнительных данных о результатах выполненных исследований в этом направлении приводится в специальной статье сборника.

Исследования в области фотоэлектрических явлений привели к следующим основным результатам.

Установлено, что инерционность нестационарной примесной фотопроводимости высокоомных компенсированных полупроводников может определяться не временем жизни носителей заряда, а инерционностью перераспределения объемного заряда, связанного на примесях, т.е. временем порядка обратной частоты волн перезарядки ловушек. Это время на много порядков может превышать время жизни и существенно ограничивать быстроедействие примесных фотосопровитлений, изготовленных из компенсированных полупроводников.

Обнаружена и исследована примесная фотопроводимость германия и кремния при энергиях фотонов, значительно меньших энергии ионизации глубоких примесных центров. Эффект объясняется фотоионизацией глубоких примесных центров при неравновесной конфигурации окружающих ядер решетки. Количественное исследование эффекта открывает возможность определения параметров глубоких примесных центров.

Обнаружен и исследован примесный фотоэлектрический эффект, заключающийся в увеличении диэлектрической проницаемости полупроводника при оптическом заселении возбужденных состояний примесей. На примере атомов галлия в германии определены поляризуемости и времена жизни возбужденных состояний.

Теоретически показано, что в полупроводниках при низкой температуре происходит фотополевая ионизация примесных центров, заключающаяся в том, что оптически возбужденный примесный центр ионизируется путем туннельного прохождения носителя заряда через кулоновский барьер под действием наложенного на кристалл однородного электрического поля. Фотополевая ионизация становится заметной при достаточно низких температурах, когда фототермическая ионизация примесей ненаблюдаема. В многодолинных полупроводниках фотополевая ионизация сильно зависит от ориентации электрического поля в кристалле и максимальна в направлении самой легкой эффективной массы (поперечной).

Теоретически предсказан новый эффект — зависимость вида оптического и фотоэлектрического спектров мелкой водородоподобной донорной примеси в полупроводнике с изотропной эффективной массой от ориентации внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей полупроводника. Наблюдение данного эффекта позволяет определить, является ли донор примесью замещения или примесным комплексом с более низкой симметрией.

Созданы двойные гетероструктуры InP/InGaAsP, излучающие на длине волны  $\lambda = 1,5$  мкм, и исследованы их оптические и фотоэлектрические свойства. На основе этих структур созданы светодиоды для ВОЛС мощностью 3 мВт с выводом излучения через окно в подложке.

На основе кристаллов ниобата бария–стронция созданы лабораторные макеты низковольтных электрооптических коммутаторов многомодовых световодов с временем переключения менее  $10^{-7}$  с, потерями излучения при переключении из одного световода в другой менее 10%, управляющим напряжением 35 В.

Обнаружена зависимость формы спектра фото-ЭДС гетероструктуры CdSe–CdS в области поглощения CdSe от напряжения падения света.

*Акустоэлектроника и акустооптика.* В 1979–1983 гг. получили дальнейшее развитие исследования ИРЭ в области акустоэлектроники и акустооптики. В частности, были получены следующие наиболее значимые результаты.

Разработана методика оптимального синтеза полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и создан ряд усовершенствованных конструкций фильтров с емкостным взвешиванием электродов. В частности, создан фильтр промежуточной частоты для телевизионных приемников цветного изображения I класса со стабильной воспроизводимостью электрических характеристик от образца к образцу, удовлетворяющий всем техническим требованиям международной системы СЕКАМ.

Предложен и исследован новый метод подавления ложных сигналов в акустических линиях задержки на основе введения рассеяния волны на статистически неровных (шероховатых) торцах звукопровода. В диа-

пазоне частот до 10 ГГц получено ослабление ложного сигнала 20 дБ, что позволяет конструировать акустические линии задержки на малые, порядка 0,5 мкс, длительности.

На основе пленок ZnO и системы встречно-штыревых электродов созданы эффективные преобразователи для возбуждения поверхностных акустических волн в непьезоэлектрических кристаллах. Минимальные потери преобразования при возбуждении ПАВ в плавленом кварце  $\sim 7$  дБ на частотах до 200 МГц.

Впервые получен эффект многопролетной генерации акустических волн в переменном электрическом и постоянном магнитном поле за счет холловского тока в  $n$ -ZnSb при 77 К на частотах до 2,8 ГГц.

Предложен новый эффективный материал для звукопроводов акустических линий задержки СВЧ-диапазона волн на основе иттрий-алюминиевого граната, активированного редкоземельным элементом лютецием. В этом материале величина поглощения в два раза меньше, чем в кристаллах рубина.

Исследованиями в области акустооптики предсказана возможность существенно нелинейной модуляции диэлектрической проницаемости кристалла звуком и другие акустооптические явления. Показано, что звук может быть усилен светом в процессе акустооптического взаимодействия.

Обнаружен и исследован новый тип коллинеарного взаимодействия света с поверхностной акустической волной в планарных диффузионных световодах из ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), сопровождающийся преобразованием волноводной световой моды  $TE_0$  в объемную волну. Применение данного акустооптического взаимодействия позволяет увеличить динамический диапазон планарных акустооптических устройств обработки информации на 15–20 дБ.

Обнаружен и исследован эффект преобразования оптических мод планарного волновода в объемные световые волны в кристалле с поворотом плоскости поляризации на  $90^\circ$ , возникающий при коллинеарном взаимодействии оптических мод с поверхностными акустическими волнами. Этот эффект перспективен для создания микроминиатюрных планарных акустооптических спектроанализаторов радиосигналов с частотами до 1 ГГц.

*Физика магнитных явлений.* В данном направлении в 1979–1983 гг. получили значительное развитие исследования свойств магнитостатических волн при их распространении в различных средах, а также разработки и исследования магнитных сред, необходимых для регистрации излучений и для других видов обработки информации. В частности, были получены следующие результаты.

Теоретически предсказано и экспериментально обнаружено существование полосовой доменной структуры в ферромагнетиках в сильных (порядка 110 кЭ) магнитных полях.

Изучено влияние слоистой структуры магнитных эпитаксиальных пленок на свойства доменов; в слоистых пленках ферритов-гранатов впервые обнаружены внутриобъемные домены, обладающие скоростью движения свыше 100 м/с.

Теоретически предсказаны и экспериментально наблюдаются гигантские (50–60 дБ) осцилляции в частотной характеристике прохождения квазиповерхностной спиновой волны через тонкую пленку железиттриевого граната, что открывает возможность создания на новом принципе заграждающих и полосовых фильтров в диапазоне 1–10 ГГц.

Предложен метод оценки влияния различных механизмов, определяющих температурные изменения преломления света в магнитных диэлектриках; изучено преломление, двупреломление и фотоупругий эффект в кубических кристаллах  $\text{RbMnF}_3$ ,  $\text{KNiF}_3$ ,  $\text{KMnF}_3$  и в одноосных кристаллах фторидов марганца, кобальта и магния; выделены термооптический, пьезооптический, магнитострикционный, термомагнитооптический и чисто магнитооптические вклады в температурные изменения преломления света. Теоретически показано, что из-за магнитоупругого взаимодействия уединенная волна типа движущихся солитона или доменной границы может существовать при скоростях значительно превышающих предельную скорость Уокера.

Установлено, что светочувствительность предложенной в ИРЭ гетерогенной среды для записи изображений существенно зависит от величины частиц наполнителя. Показано, что воздействие на эти частицы поверхностных сил (механических или гидродинамических) вместо объемных позволяет увеличить светочувствительность гетерогенной среды на 2–3 порядка.

Выявлены особенности влияния неоднородного обмена на распространение поверхностных и объемных магнитостатических волн в тонких эпитаксиальных пленках железиттриевого граната. При импульсном распространении обнаружены осцилляции интенсивности и времени задержки импульсов, что может найти практическое применение в технике СВЧ.

Экспериментально обнаружена сильная реакция преобразователя поверхностных магнитостатических волн, избирательного по волновому числу, на характеристики перестраиваемых СВЧ-фильтров на магнитных пленках; показано, что при возбуждении поверхностных магнитостатических волн на границе пленка–подложка, можно создать фильтр с гладкой амплитудно-частотной характеристикой и полосой пропускания 25–30 МГц на частотах 2–5 ГГц.

Предложен и реализован интерферометрический метод определения закона дисперсии и затухания магнитостатических волн вплоть до весьма малых длин волн (5 мкм). Применение этого метода к пленкам железиттриевого граната впервые позволило исследовать зависимость параметров обменных щелей в спектре от кристаллографической ориентации и толщины пленки.

Разработана магнитооптическая методика считывания информации с поврежденного магнитного носителя, не восстанавливаемой ранее существовавшими способами, что, в частности, позволяет более точно анализировать причины авиационных происшествий.

*Кристаллофизика и создание материалов для твердотельной электроники.* В 1979–1983 гг. в этом направлении проводились обширные работы, направленные на обеспечение кристаллами и пленками выполнявшихся в ИРЭ НИР. Из результатов этих работ следует отметить следующее.

Разработана лабораторная технология получения методом молекулярной эпитаксии нелегированных и легированных оловом пленок арсенида галлия толщиной 0,15–0,5 мкм с концентрацией электронов до  $10^{-17}$  см<sup>-3</sup>.

Разработана технология получения высококачественных пьезоэлектрических пленок окиси цинка, пригодных для создания эффективных устройств на объемных и поверхностных акустических волнах.

Разработан ряд рентгенографических методик для анализа реальной структуры подложек полупроводников  $A^{III}B^V$  и двойных гетероструктур на основе их твердых растворов, а также метод выращивания малодислокационных двойных гетероструктур (AlGaAs–CaAs).

Разработана лабораторная технология получения эпитаксиальных слоев фосфида индия с концентрацией электронов  $8 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и подвижностью: при комнатной температуре  $4 \cdot 10^3$  см<sup>2</sup>/(В·с) и при температуре жидкого азота — до  $2,6 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/(В·с).

Разработана методика получения оптически прозрачных проводящих пленок  $In_2O_3-SnO_2$  с коэффициентом пропускания света  $\sim 90\%$  и поверхностным сопротивлением 2,5 кОм/см<sup>2</sup>.

Разработана лабораторная технология получения сложных гетероструктур GaAs–Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As — GaAs–Ga<sub>1-x</sub>, позволяющая получать однородные по поверхности гетероструктуры с широким изменением твердого раствора Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As и резкими границами гетеропереходов.

Аналогичные достижения получены и по разработке других материалов твердотельной электроники.

Ряд результатов по физике твердого тела был получен и в таких областях, как радиоспектроскопия конденсированных сред и материалы для квантовой электроники. Так, например, радиоспектроскопия конденсированных сред обогатилась новым (модуляционным) методом исследования ядерного магнитного резонанса в твердом теле, обеспечивающим тысячекратное уменьшение ширины линии. Это открывает новые возможности исследования структуры и внутренней динамики твердых тел. В области создания новых лазерных материалов заслуживает быть отмеченной разработка нового состава хром-иттербий-эрбиевого стекла, позволяющего в лабораторных условиях получить в импульсно-периодическом режиме мощность более 2 Вт при КПД более 1% (при ламповой накачке).

## **VI. Автоматизация научных исследований**

В 1979–1983 гг. в ИРЭ продолжались разработка и внедрение систем автоматизации экспериментов, технологических процессов и других задач применительно к потребностям Академии наук СССР и ИРЭ АН СССР. В частности:

— совместно с Институтом электронных управляющих машин завершена разработка и внедрены в производство измерительно-вычислительные комплексы ИВК-2, ИВК-3 и ИВК-20;

— разработана методика, создан и применен на практике комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих построение систем автоматизации экспедиционных радиофизических экспериментов;

— разработан и внедрен в опытное производство специализированный Фурье-процессор для обработки сигналов в полосе частот до 500 кГц в реальном масштабе времени;

— завершена разработка и осуществлен ввод в эксплуатацию многофункционального многомашинного иерархического измерительно-вычислительного комплекса для автоматизации научных исследований института на базе отечественной серийной программно-совместимой вычислительной техники (ЭВМ М-4030; СМ-3, -4; «Электроника-60») и аппаратуры сопряжения в стандарте КАМАК.

Данные, приведенные в настоящей статье, не исчерпывают результатов научных исследований, полученных ИРЭ в 1979–1983 гг. Это объясняется незавершенностью ряда исследовательских работ или недостаточной их проверкой при использовании в народном хозяйстве страны. Эти результаты будут отражены в последующих выпусках трудов института.