

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ, ПРОВЕДЕННЫЕ В ИРЭ АН СССР В 1953–1978 ГГ.¹⁾

В. А. Котельников, К. И. Палатов

Начальный период (1954–1960 гг.)

Как известно, в нашей стране выполнение фундаментальных и поисковых исследований возложено в значительной степени на институты Академии наук СССР и академий союзных республик. Для проведения таких исследований в области радиотехники и электроники в Академии наук СССР в 1953 г. был организован Институт радиотехники и электроники (ИРЭ).

Первоначальная тематика института во многом определялась научными направлениями исследований, выполнявшихся вошедшими в состав института секцией по научной разработке проблем радиотехники АН СССР под руководством Б. А. Введенского и отделом электроники Института автоматики и телемеханики АН СССР, возглавляемым Д. В. Зерновым. Эта тематика охватывала такие вопросы, как тропосферное распространение радиоволн, волноводная техника, эмиссионная электроника, системы генерирования, усиления и приема в СВЧ-диапазонах. Последнее направление было тесно связано с деятельностью Н. Д. Девяткова.

Под руководством Ю. Б. Кобзарева, В. А. Котельникова и В. И. Сифорова были начаты работы по выделению слабых сигналов из шумов, по обработке и передаче информации.

Исследовательские работы по этим направлениям стали интенсивно развиваться с самых первых дней существования института и уже к концу 50-х годов завершились существенными научными и практически важными результатами.

В этот период интенсивно развиваются работы по исследованию распространения радиоволн КВ- и УКВ-диапазонов под руководством Б. А. Введенского и при активном участии А. Г. Аренберга, Л. А. Жекулина и А. Н. Казанцева. Особое внимание было уделено исследованию дальнего тропосферного распространения (ДТР) УКВ и его использованию на практике. В работах Б. А. Введенского и его учеников были установлены основные механизмы ДТР: «некогерентное рассеяние» на

¹⁾ Из сб. Проблемы современной радиотехники и электроники. Под ред. В. А. Котельникова. М.: Наука, 1980 г. Сокращенный вариант.

тропосферных глобулах турбулентного происхождения, отражение и рассеяние от достаточно протяженных и стабильных слоев тропосферы. Эти механизмы были исследованы не только теоретически, но и экспериментально, причем для этого была создана уникальная исследовательская аппаратура (рефрактометры и др.). В итоге был создан метод инженерного расчета трасс ДТР протяженностью до 1000 км, получивший применение при разработках практических линий связи с использованием ДТР. Научно-исследовательские работы по этому направлению были затем обобщены в монографии. В этот же период в ИРЭ исследуются такие вопросы, как поглощение радиоволн в ионизированных слоях атмосферы, поляризация отраженных от ионосферы коротких радиоволн и др., сыгравшие значительную роль в последующих исследованиях распространения радиоволн в ионосфере Земли.

В области волноводной техники в течение 50-х годов была развита теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами, а также проводились исследовательские работы по выяснению условий распространения волн H_{01} в круглом волноводе, которые позже дали практически важные результаты в области использования круглых волноводов. Были развиты также исследования по электродинамике волноводов, показавшие высокую эффективность применения волноводов круглого сечения в миллиметровом диапазоне волн. С этого времени в ИРЭ начали проводиться исследования, направленные на освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн.

В первые годы существования ИРЭ под руководством Ю. Б. Кобзарева, В. А. Котельникова, В. И. Сифорова, В. И. Бунимовича и других уделялось много внимания развитию научных исследований в области помехоустойчивости радиосистем.

Из опубликованных работ за этот период следует отметить вышедшую в 1956 г. в виде отдельной монографии работу В. А. Котельникова по теории потенциальной помехоустойчивости.

Под руководством Ю. Б. Кобзарева выполнялись работы по анализу метода обнаружения слабых сигналов в шумах, по измерению статистических характеристик случайных напряжений (для этой цели разработан специальный прибор, получивший широкое распространение) и ряд других работ в области статистической радиотехники.

В. И. Сифоров и его сотрудники проводят в этот период исследования в области радиоприема и передачи информации по каналам связи, а в связи с работами по дальней тропосферной связи исследуют такие вопросы, как перекрестные искажения в многоканальных системах связи, двоянный (разнесенный) прием УКВ, энергетический спектр частотно-модулированных колебаний при распространении УКВ в тропосфере и другие, создают специальное приемное устройство для измерения статистических характеристик сигналов при тропосферном распространении радиоволн.

Применительно к задачам, выдвигавшимся практикой создания радиорелейных линий связи, в ИРЭ были проанализированы основные

проблемы многоканальных радиорелейных линий связи и выявлены законы распределения вероятностей замираний и шумов в таких линиях, что позволило дать конкретные рекомендации для разработки и эксплуатации линий, а также выполнен ряд исследований в области кодирования и декодирования радиосигналов — исследована помехоустойчивость систем с корректирующими кодами, их применение в ведомственной связи, разработаны эквидистантные и другие оптимальные и близкие к оптимальным коды.

Из работ по этому направлению следует отметить работы В. И. Бунимовича, которым были исследованы такие важные вопросы для систем радиосвязи и радиолокационных систем, как прохождение сигналов и шумов через нелинейные устройства, вероятность искажения сигналов, вызванных попутным потоком и гауссовым шумом, вероятность правильного обнаружения при оптимальном приеме сигнала с неизвестной фазой и др.

Одновременно с этим в ИРЭ ставится ряд исследований по разработке оптимальных элементов приемных радиосистем — высокочастотных электромеханических фильтров, невзаимных ферритовых элементов сантиметрового диапазона, большого количества волноводных элементов для систем на волне H_{01} , генераторов наносекундных импульсов и различных видов усилителей для исследования таких систем.

Под руководством А. А. Пистолькорса выполняется оригинальное исследование плазменной антенны и развиваются работы по созданию ферритовых параметрических усилителей СВЧ.

В 1957 г. сотрудники ИРЭ приняли участие в разработке методик приема и обработки сигналов с ИСЗ. На основе полученных с ИСЗ данных Л. А. Жекулиным и его сотрудниками было определено распределение электронной концентрации в ионосфере по высоте и сделаны важные выводы о влиянии этого распределения на распространение радиоволн. Этими работами положено начало широкому фронту исследований космического пространства радиофизическими методами.

В период становления ИРЭ в нем постепенно выкристаллизовалось и к началу 60-х годов оформилось новое тогда направление исследований — квантовая радиофизика.

Первоначальные работы в этом направлении связаны с исследованиями стабилизации частоты, в частности с созданием репера частоты с молекулярным генератором, с созданием схем для сравнения частоты кварцевого генератора с частотой молекулярного генератора, с исследованием фазовой автоподстройки клистрона по молекулярному генератору. Заметим, что одновременно с этим выполнен ряд исследований по делению и умножению частоты на клистронах и исследованию процессов в кварцевых генераторах.

В области электроники в начальный период существования ИРЭ получают развитие исследования как в области вакуумной, так и в области плазменной и твердотельной электроники. Оригинальным и важным направлением исследований в области вакуумной электроники

явилась в этот период разработка З.С. Черновым и его сотрудниками под руководством Н.Д. Девяткова новых электронных приборов с центробежно-электростатической фокусировкой протяженных электронных потоков, в первую очередь аналогов ламп бегущей и обратной волны — спиратронов. В результате проведенных исследований и разработок показана возможность замены в усилительных ЛБВ 10-сантиметрового диапазона волн магнитной фокусировки центробежно-электростатической фокусировкой. При этом резко сокращались расход мощности питания, габариты и вес усилительной лампы без ухудшения других ее параметров ($K_y \approx 30$ дБ и т.п.), что открывало новые области применения таких приборов.

В процессе этих научно-исследовательских работ получены новые данные по устойчивости и надежности работы ЛБВ и, что особенно важно, по взаимодействию трубчатых электронных пучков с поверхностными электромагнитными волнами, что ведет к увеличению электронных КПД таких систем. Начатые в тот период работы по исследованию электронных пучков в последующие годы значительно расширены.

Другое направление исследований в области вакуумной электроники продиктовано потребностью народного хозяйства в элементах, необходимых для создания цифровых вычислительных машин, и слабой развитостью этого направления в тот период в твердотельной электронике. Разработанные в ИРЭ трохотроны, универсальные двоичные переключатели, электронно-лучевые трубки для записи быстро протекающих процессов и т.п. получили быстрое внедрение и сыграли важную роль в создании первых цифровых вычислительных устройств.

В начальные годы после организации ИРЭ в его стенах были поставлены первые работы в области генерирования электромагнитных волн миллиметрового диапазона и проведены исследования релятивистских процессов в линейных ускорителях заряженных частиц. В эти же годы в ИРЭ для генерирования СВЧ-колебаний привлекается такое агрегатное состояние вещества, как электронно-ионная плазма. Работы по исследованию взаимодействия электронных потоков с плазмой и создание первых плазменных усилителей вызвали отклик в мировой литературе и привели к значительному расширению фронта исследований по этому направлению. Эти работы проводились В.Я. Кисловым и другими сотрудниками под руководством Н.Д. Девяткова и З.С. Чернова.

В 1954–1960 гг. под руководством Д.В. Зернова и М.И. Елинсона получают значительное развитие работы по исследованию автоэлектронной эмиссии. В ходе этих исследований изучены закономерности возникновения и количественные характеристики этого явления для многих материалов: металлов, полупроводников и диэлектриков (вольфрама, германия, рения, гексаборида лантана, окислов MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , диэлектриков с примесями, металлов с тонкими диэлектрическими слоями и т.п.). Полученные результаты нашли быстрое внедрение в промышленности, а их научная сущность обобщена

в монографии. Использование результатов исследования автоэмиссионных процессов при разработке рентгеновских трубок отмечено присуждением М. И. Елинсону в 1978 г. Государственной премии СССР. Начатые тогда исследования вторично-электронных процессов привели к заметному практическому выходу и получили значительное развитие в последующих научно-исследовательских работах института.

В этот период Б. М. Царевым и его сотрудниками выполняется ряд актуальных для практики исследований в области термоэлектронной эмиссии и катодной электроники, а под руководством Т. М. Лифшица получают развитие работы в области создания и исследования эмиттеров для фотоэлектрических приборов.

После организации в ИРЭ в 1956 г. отдела полупроводников под руководством С. Г. Калашникова получают быстрое развитие исследовательские работы в области создания твердотельных приборов: германиевых и кремниевых СВЧ-детекторов, туннельных диодов, полупроводниковых диодов для параметрических усилителей СВЧ, а также ставятся глубокие физические исследования рекомбинационных процессов в полупроводниках, в частности исследование влияния элементов III и V групп на скорость рекомбинации электронов и дырок в германии, легированном различными примесями. В этот период начинаются фундаментальные работы ИРЭ по изучению электронной плазмы в полупроводниках и эмиссии горячих электронов из полупроводников. Эти работы имели пионерский характер, они вызывали большой интерес не только в научных кругах, но и в промышленных организациях.

Таковы были первые шаги института на пути его превращения в ведущую научно-исследовательскую организацию Академии наук в области радиотехники и электроники.

В итоге примерно 5-летнего существования Института были преодолены основные трудности организационного периода, сформирован научный коллектив, определены основные направления исследований и завоеван должный внутрисоюзный и международный авторитет, т. е. достигнут определенный устойчивый научный уровень, начиная с которого можно было двигаться дальше.

Годы развития (1961–1978 гг.)

Из сказанного выше следует, что к концу 50-х годов научные интересы ИРЭ концентрировались вокруг следующих вопросов:

- закономерности распространения радиоволн;
- космические исследования;
- статистическая радиофизика;
- вакуумная электроника;
- физика плазмы;
- физика магнитных явлений на сверхвысоких частотах;
- физика полупроводников и диэлектриков;
- квантовая радиофизика.

Среди этих направлений были уже ставшие для Института традиционными такие, как распространение радиоволн, статистическая радиофизика и вакуумная электроника, и только что возникшие и быстро развивающиеся — исследования космоса, плазмы, полупроводников и диэлектриков, квантовых систем. Таким образом, Институт оказался в центре актуальнейших научных проблем начала 60-х годов.

Ниже излагаются основные результаты исследований за указанный период по основным научным направлениям.

Распространение радиоволн

Кроме исследований по дальнему тропосферному распространению УКВ, которые продолжались вплоть до выхода в 1965 г. монографии, в ИРЭ в 60-х годах начали активно развиваться работы по изучению распространения и поглощения в различных средах миллиметровых, субмиллиметровых, оптических и сверхнизкочастотных волн.

В сравнительно меньших масштабах велись работы по изучению распространения электромагнитных колебаний квазиоптического и оптического диапазонов в направляющих системах, а также влияния турбулентной атмосферы на свойства больших антенн. Исследования в области освоения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов касались таких вопросов, как молекулярное поглощение этих волн в кислороде и водяном паре атмосферы, ослабление в дожде, а также амплитудные и фазовые флуктуации, обусловленные неоднородностями показателя преломления.

В целом теоретические и экспериментальные исследования в области распространения субмиллиметровых волн, выполненные под руководством А. В. Соколова, выявили их особенности, позволяющие сделать заключение о практическом применении этого диапазона воли в различных конкретных условиях. Большое значение имело то обстоятельство, что для проводимых исследований была создана соответствующая измерительная аппаратура этого диапазона волн, что само по себе представляло сложную научно-техническую задачу.

Начиная с середины 60-х годов в ИРЭ под руководством М. А. Колосова и А. В. Соколова начали также интенсивно проводиться исследования по изучению закономерностей распространения электромагнитных колебаний оптического диапазона в условиях незамутненной атмосферы и при наличии в ней различных гидрометеоров.

Изучение ослабления лазерного излучения в аэрозолях и осадках различных типов проводилось в видимом (0,63 мкм) и инфракрасном (10,6 мкм) диапазонах волн. Сравнение измеренных коэффициентов ослабления показало заметно большее ослабление оптических волн по сравнению с инфракрасным диапазоном в облаках и туманах и практически одинаковое в дождях. Выполненные исследования показали также, что при воздействии достаточно мощного излучения в инфра-

красном диапазоне прозрачность тумана может быть увеличена за счет испарения капель.

Исследование распространения электромагнитных волн оптического диапазона проводилось также в направляющих системах — в закрытых квазиоптических линиях (лучеводах), состоящих из последовательности корректирующих линз или зеркал, а позднее, с начала 70-х годов, в волоконно-оптических линиях передачи (световодах).

Первая задача завершилась созданием опытной подземной квазиоптической линии связи длиной 2 км, в которой лазерный пучок заключен в трубу со стабильным газовым наполнением. В качестве корректоров сечения и направления движения луча через каждые 100–200 м в трубе располагаются длиннофокусные линзы или зеркала. Для такой системы была создана теория оптимальной автоподстройки, теоретически исследовано влияние градиента температуры в грунте и возникающей турбулентности в наполняющем газе (воздухе). Проведенные исследования показали, что в подземных лучеводах со стабильными условиями лазерные пучки могут передаваться на большие расстояния, а квазиоптические системы могут быть применены для различных случаев передачи информации (связь, радиоастрономия и т. п.). Эти исследования выполнены под руководством Б. З. Каценеленбаума и Р. Ф. Матвеева.

Распространение оптических волн в волоконных световодах — еще одна тема исследований. Здесь важно отметить, что исследования по технологии создания световодов и по созданию на их основе волоконно-оптических линий связи, проведенные в ИРЭ и других организациях, позволили в настоящее время поставить вопрос о широкой замене кабельных и других проводниковых линий на технически и экономически более выгодные световолоконные линии. Большая заслуга в этом принадлежит М. Е. Жаботинскому и А. В. Соколову. В ИРЭ под руководством Н. А. Арманда проводились также исследовательские работы по изучению влияния турбулентной атмосферы на свойства больших антенн.

Космические исследования

Начиная с 1960 г. космические исследования в институте развивались по трем направлениям: радиолокация планет, исследования распространения радиоволн в космосе и исследования земной ионосферы по материалам, полученным с ИСЗ.

Здесь же целесообразно лишь отметить, что работы по всем трем направлениям тесно связаны с общей программой космических исследований в СССР.

Новым направлением в изучении космоса как в советской, так и в зарубежной науке явилось радиолокационное исследование планет, начатое в ИРЭ с 1960 г. Постановка этих исследований явилась следствием требований практики запуска космических аппаратов к пла-

нетам Солнечной системы об уточнении величины астрономической единицы.

Первые радиолокационные исследования планеты Венеры, выполненные в ИРЭ в содружестве с промышленными организациями, были проведены в 1961 г. Эти исследования позволили выявить ряд специфических требований к аппаратуре и методике эксперимента и в последующих циклах радиолокационных исследований (1961–1977 гг.) Венеры, Марса, Меркурия и Юпитера получить уникальные результаты о ряде параметров (эфемерид) этих планет и с необходимой для практики точностью определить величину астрономической единицы, значение которой при скорости света 299 792,5 км/с установлено равным $149\,597\,892,3 \pm 1,5$ км. Радиолокационные исследования сделали возможным исследования планет Солнечной системы при помощи межпланетных аппаратов, космическая навигация которых зиждется на данных, полученных при радиолокации планет. За выполнение этих фундаментальных исследований группа сотрудников ИРЭ во главе с В. А. Котельниковым удостоена в 1964 г. Ленинской премии.

Исследования космического пространства в ИРЭ получили новое оригинальное направление благодаря открывшейся в 60-х годах возможности исследования закономерности распространения радиоволн в дальнем космосе. Эти исследования выполнялись начиная с 1962 г. с помощью космических аппаратов типа «Венера», «Марс» и «Луна», на которых устанавливались передатчики радиоволн, в то время как излучаемые ими сигналы из различных областей Солнечной системы принимались на Земле. Таким образом, удалось изучить влияние сред, встречающихся на пути радиосигналов, на частоту, фазу, амплитуду, запаздывание и спектр радиоволн и по этим данным судить о свойствах межпланетного и околосолнечного пространства, атмосферы Марса и Венеры, поверхности Венеры и плазменной оболочки Луны.

Фундаментальные результаты исследований распространения радиоволн в дальнем космосе с помощью аппаратов типа «Венера», «Марс», «Луна», полученные под руководством М. А. Колосова, отмечены в 1974 г. Государственной премией СССР. Большая заслуга в проведении этих исследований принадлежит О. И. Яковлеву, Н. А. Савичу и Н. А. Арманду. Ионосферные исследования в ИРЭ были направлены на выяснение условий распространения через ионосферу сверхдлинных электромагнитных волн (СДВ, $f = 1 \div 100$ кГц), характерных для естественных излучений и интересных в качестве зондирующих в ряде исследований физических явлений в этой среде.

После значительной теоретической и аппаратурной подготовки экспериментальные исследования распространения СДВ в ионосфере проводились с помощью ИСЗ «Космос-142» (1967 г.) и «Космос-259» (1968 г.). Большой объем ионосферных исследований выполнен с помощью ИСЗ «Интеркосмос-Коперник 500», запущенного в 1973 г.

В результате этих экспериментов осуществлен прием в ионосфере сигналов наземных радиостанций на частотах 16,1; 31,85 и 42,85 кГц

в различное время суток и года, что позволило получить сведения о величинах напряженности поля СДВ в ионосфере при различных условиях. Исследования с помощью ИСЗ «Интеркосмос-Коперник 500», проведенные ИРЭ совместно с Институтом космических исследований Академии наук Польской Народной Республики и другими организациями по программе «Интеркосмос-Коперник 500», позволили получить новые данные, характеризующие спорадическое радиоизлучение Солнца и параметры ионосферы Земли, в частности данные по дебаевскому экранированию и неоднородностям электронной концентрации в ионосфере.

Статистическая радиофизика

По данной проблеме исследовательские работы ИРЭ развивались в основном по таким направлениям, как оптимальный прием электромагнитных сигналов с учетом качества каналов передачи, статистические свойства случайных естественных полей в диапазонах сверхдлинных волн (СДВ) и сверхнизких частот (СНЧ), радиоизлучения различных естественных земных объектов, математический анализ процессов, протекающих в сложных системах, и др.

В частности, проведен анализ получения оптимального приема сигналов, прошедших канал со случайными параметрами, анализ статистических характеристик рассеивающего пуассоновского канала, предложен принцип отождествления каналов передачи сигналов, определена вероятность ошибок бинарных сигналов, прошедших канал с замираниями, а также изучены условия оптимального разнесенного приема симметричных бинарных сигналов с оценкой параметров сигнала.

Работы в области радиоприема в ИРЭ велись под руководством В. И. Сифорова (основное направление — оптимальное кодирование и методы декодирования сигналов), до перевода его лаборатории в Институт проблем передачи информации АН СССР, и в лаборатории, возглавлявшейся Л. И. Филипповым. В этой лаборатории, в частности, изучались помехоустойчивость некогерентного приемника и различные вопросы разнесенного приема.

Большое значение для практики имели также развитые и выполненные в ИРЭ исследования статистических свойств случайных естественных полей в диапазоне СДВ и СНЧ. Возникновение этих полей связано с грозами. Цикл теоретических и экспериментальных работ по изучению поля помех в диапазоне СДВ (1–30 кГц) и СНЧ (0,03–1 кГц) позволил получить территориально-временные характеристики грозовых источников радиопомех и общие свойства поля нестационарных атмосферных помех на СДВ, а также методы местоопределения источников таких помех.

Выполненные исследования, кроме получения фактического материала по статистике гроз, создали базу для стандартизации методов измерений характеристик естественных радиопомех в диапазонах СДВ

и СНЧ, а также для разработки новых радиотехнических методов изучения явлений атмосферного электричества.

Результаты научно-исследовательских работ по этому направлению частично обобщены в монографии. Большая заслуга в проведении данных исследований принадлежит Ю. Б. Кобзареву, М. С. Александрову и Л. Т. Ремизову.

Получили развитие также исследования в области преобразования сигналов и шумов в нелинейных системах. В частности, подверглись подробному исследованию стохастические колебания в плазме, а также в вакууме и твердотельных автоколебательных системах. В процессе этих исследований обнаружено и изучено явление нелинейной стохастизации колебаний в автогенераторах с запаздывающей обратной связью. Это явление возникает при достаточно большом значении глубины обратной связи за счет развития нелинейно-стохастической неустойчивости (а не за счет воздействия флуктуаций). Кроме того, исследовано влияние нелинейных элементов на чувствительность СВЧ-приемников. Большая заслуга в работах по исследованию стохастических процессов принадлежит В. И. Бунимовичу и В. Я. Кислову.

Заслуживают внимания работы, выполненные математиками института (В. Ф. Крапивин и др.), в области развития теоретико-игровых методов применительно к оценке различных процессов в сложных системах и ситуациях. Результаты этих исследований обобщены в монографии и нашли применение не только в радиотехнике, но и при решении ряда вопросов кибернетики, океанологии и других областей науки и техники.

Исследования в области распространения радиоволн и статистической радиофизики явились основой для возникновения в ИРЭ нового научного направления — исследования радиоизлучения поверхности Земли и различных ее компонентов с помощью радиометрической аппаратуры, помещаемой на искусственных спутниках Земли и самолетах. В этой области исследований в ИРЭ совместно с Институтом физики атмосферы и Институтом космических исследований АН СССР с помощью ИСЗ «Космос-243» и «Космос-384» (руководителем НИР в ИРЭ являлся А. Е. Башаринов) получены данные по состоянию полей температуры, влажности и гидрометеоров в атмосфере и на поверхности Земли, в том числе закономерности сезонных изменений, влияние синоптических факторов, вариации температурных полей в различных районах Земли, включая Антарктиду, Сахару, Гренландию и т. п.

В дальнейшем на основе созданной в ИРЭ радиометрической аппаратуры и оборудования ряда самолетных лабораторий (на самолетах Ил-18, Ил-14, Ан-24, Ан-2) удалось наметить решение таких важных прикладных задач, как использование СВЧ радиофизических методов в геологии и гляциологии, обнаружение геотермальных потоков и разломов земной коры, измерение влажности и температуры поверхности грунта, толщины снежного покрова, обнаружение активных зон лесных

пожаров (в задымленных районах леса), опасности самовозгорания торфа и т. п..

Вакуумная электроника и электронно-ионная плазма

По этой проблеме работы ИРЭ развивались в основном по трем направлениям:

- формирование ионных потоков и высокоперевансных электронных пучков;
- анализ нестабильностей при плазменно-пучковом разряде;
- эмиссионная электроника.

В результате теоретических и экспериментальных работ по этому направлению, выполненных под руководством З.С. Чернова, удалось создать сильноточные электронные пушки с центробежно-электростатическим формированием пучка. Такая пушка способна, например, создавать цилиндрический электронный поток с током пучка 600 А при ускоряющем напряжении > 100 кВ. Основная особенность таких электронных пушек — высокая компрессия электронного пучка и хорошая ионнозащищенность катода. Такие электронные пушки имеют разнообразное практическое применение как в импульсном, так и в непрерывном режимах.

Весьма оригинальными являются выполненные в ИРЭ исследования высокочастотных нестабильностей в ионных пучках при различных условиях и создание нелинейной теории высокочастотного взаимодействия ионного и электронного пучков.

Необходимо отметить также теоретические работы В.Н. Данилова в области синтеза электронно-оптических систем с криволинейной осью и его работы, связанные с расчетом электрического поля внутри и снаружи трубчатого пучка, с расчетом многолучевых электронных пушек, формирующих сходящиеся электронные пучки, и др..

Значительный цикл работ ИРЭ посвящен исследованию характеристик взаимодействия электронных пучков с плазмой в продольном магнитном поле и определению возможных механизмов процессов обмена энергией между заряженными частицами и полями в электронно-ионной плазме, создаваемой в основном при использовании плазменно-пучкового разряда. В этих исследованиях был развит метод фазово-частотного анализа, применимый для изучения любых сложных колебательных процессов с нестационарными гармоническими включениями. Полученные результаты позволили дать объяснения природе возникновения и развития пучковой неустойчивости при прохождении электронного пучка через плазму и объяснить такие вновь обнаруженные явления, как преобразование энергии пучка электронов, обусловленное аномальным эффектом Доплера, скачкообразное изменение фазы высокочастотных колебаний в плазме, кратковременное одномодовое (когерентное) взаимодействие электронного пучка с плазмой,

и их связь со стохастичностью колебательного процесса на нелинейной стадии пучковой неустойчивости и т. п..

Интересным развитием этих работ явилось исследование прохождения электронного пучка через нейтральный газ в отсутствие внешних электрических и магнитных полей. При этом экспериментально была обнаружена возможность формирования неоднородного локального плазменного образования с концентрацией заряженных частиц порядка 10^{10} – 10^{11} см⁻³, существенно превышающей концентрацию электронов инжектируемого пучка. Исследования показали, что в этом случае образование области неоднородной плазмы происходит за счет СВЧ-пробоя газа в поле, возбуждаемом при развитии неустойчивости пучка, дрейфующего через сформированную им первичную плазму. Неустойчивость возникает на частотах, меньших плазменной частоты, и связана с возбуждением продольных плазменных колебаний. При этом плазменная частота обычно значительно превышает частоту столкновений плазменных электронов с нейтральными молекулами газа, и поэтому пробой газа возникает в электрических полях с напряженностью, достаточной для рассеяния электронов инжектируемого пучка и возникновения локального плазменного образования.

Проведенные в ИРЭ исследования пучково-плазменных систем без искусственно создаваемого магнитного поля используются для объяснения ряда атмосферных явлений (полярные сияния, ионосферное радиоизлучение и др.).

К работам по пучкам и плазме примыкают работы (исследования по плазменно-пучковым системам выполнены под руководством Н. Д. Девяткова и И. Ф. Харченко) ИРЭ в области анализа нелинейных процессов в СВЧ-приборах и возникающих из-за этого побочных колебаний. Этими работами была показана взаимосвязь основных проблем мощной СВЧ-электроники — проблемы обеспечения больших значений коэффициента полезного действия и проблемы генерации колебаний с чистым спектром. В процессе этих исследований в ЛБВО средней мощности было изучено влияние на уровень второй гармоники таких факторов, как дисперсия замедляющей системы, местоположение поглотителя, шумы, возникающие в приколлекторной области, и т. п. Проведенные исследования показали также возможность снижения уровня второй гармоники в приборах *M*-типа без существенного понижения КПД. Найденные оптимальные соотношения параметров находят практическое применение в электронной промышленности.

Начиная с 1965 г. в ИРЭ под руководством Н. Д. Девяткова начали проводиться исследования по проблеме взаимодействия электронных колебаний миллиметрового диапазона волн с веществом при малом (нетепловом) уровне мощности колебаний. В результате этих работ, выполнявшихся ИРЭ в кооперации с другими организациями, установлены факты специфического воздействия миллиметрового излучения на ряд биологических объектов, носящего в ряде случаев характер резонансного воздействия. Эти работы открывают возможность эффек-

тивного использования миллиметрового диапазона электромагнитных колебаний в биофизических и медицинских исследованиях и развития новых областей применения миллиметровой и субмиллиметровой спектроскопии.

Исследования в области эмиссионной электроники были направлены на создание наиболее эффективных эмиттеров для вакуумных и плазменных приборов.

Как уже отмечалось, в ИРЭ еще в 50-х годах начали развиваться исследования вторично-электронных процессов. При исследовании вторичной электронной эмиссии диэлектриков на прострел на эмиттерах из высокопористых слоев окиси магния был обнаружен и исследован новый тип эмиссии — безынерционная вторичная электронная эмиссия, усиленная полем. В дальнейшем такой вид эмиссии был найден у эмиттеров из многих веществ. Сущность явления заключается в том, что слой пористого диэлектрика толщиной 15–20 мкм наносится на проводящую алюминиевую подложку толщиной приблизительно 200 Å и простреливается со стороны подложки первичным электронным пучком. Эмиссия в вакуум наблюдается со свободной поверхности эмиттера, причем при положительной зарядке поверхности стимулируется выход в вакуум вторичных электронов, образованных в пористом диэлектрике. В результате происходит вторично-электронное усиление в 25–50 раз, что в сочетании с быстродействием, превышающим 10^{-10} с, открывает перед такими эмиттерами широкие области применения в качестве умножителей для регистрации элементарных частиц, для усиления и преобразования изображений и особенно в качестве мишеней для телевизионных преобразователей изображения — секонов. Такие преобразователи, кроме наилучшей передачи изображений движущихся объектов, могут работать в режиме длительного накопления при записи слабых изображений и длительно сохранять записанную информацию.

В начале 70-х годов в ИРЭ начали исследоваться вторично-электронные процессы в полупроводниковых системах с отрицательным электронным сродством. Создана теория вторичной электронной эмиссии на отражение и на прострел в этих системах, позволяющая оценить такие параметры эмиттера, как вероятность выхода в вакуум и эффективная диффузионная длина вторичных электронов, эффективный пробег первичных электронов в зависимости от их энергии и т. п.

Эта теория была проверена в экспериментах на слоях арсенида и фосфида галлия, активированных цезием и кислородом. Следует отметить, что для экспериментов с эмиттерами, обладающими отрицательным электронным сродством, требуется очень высокое разрежение, достигаемое только при безмасляной откачке. Задача создания впервые в СССР сверхвысоковакуумных камер с давлением меньше чем $5 \cdot 10^{-10}$ Тор была успешно решена СКБ ИРЭ. Образец такой камеры был удостоен Золотой медали Лейпцигской ярмарки и нашел большой спрос во внутрисоюзных организациях. В результате иссле-

дований были созданы высокоэффективные сравнительно низкоомные вторично-электронные эмиттеры с отрицательным электронным средством, по своим параметрам значительно превосходящие ранее существовавшие. Эти эмиттеры сразу же получили практическое применение в промышленной электронике. Большая заслуга в проведении этих исследований принадлежит коллективу сотрудников, работавших под руководством Н. Л. Яснопольского.

В ИРЭ получили развитие и работы по изучению термоэлектронной эмиссии, причем центр тяжести этих исследований постепенно переходил от катодных систем для вакуумных приборов (показательно исследование термоэлектронной эмиссии оксидно-иттриевого катода) к эмиттерам, предназначенным для работы в сложной газовой среде и в высокотемпературных условиях, как, например, в условиях МГД-генераторов. В этих исследованиях решалась нетривиальная задача поисков наиболее эффективного сочетания термоэмиссионных свойств с другими физико-химическими свойствами и теплофизическими условиями работы в МГД-генераторе. На основе этих исследований, проведенных совместно с Институтом высоких температур АН СССР, предложены такие новые катодные материалы, как двойные окислы церия и тантала, иттрия и циркония, а также различные металлокерамические модификации катодов такого рода и ряд тугоплавких карбидов (карбиды циркония и титана с присадками различных активирующих тугоплавких металлов). Металлокерамический катод на основе хромита лантана и хрома был испытан в МГД-генераторе открытого цикла и оказался лучше ранее известных катодных материалов. Двухслойные эмиттеры с пленкой осмия и эмиттеры на основе графита также показали эффективность и рекомендованы для применения в МГД-генераторах. Руководителем работ по этому направлению в ИРЭ является Б. С. Кульварская.

В ИРЭ были развиты исследования термоионной эмиссии твердотельных источников ионов щелочных материалов (алюмосиликатов щелочных металлов), предназначенных для обработки активных поверхностей фотокатодов с целью повышения стабильности и воспроизводимости параметров фотоэлектронных приборов. Разработанные источники успешно применяются в производстве фотоэлектронных приборов. Кроме того, в области эмиссионной электроники в 60-х годах в ИРЭ велся поиск новых типов ненакаливаемых катодов и, в частности, был предсказан и реализован ненакаливаемый катод с отрицательным электронным средством на основе диода Шоттки.

Физика магнитных явлений на сверхвысоких частотах

Значительное развитие в ИРЭ получили исследовательские работы в области физики магнитных явлений в ферритах. Начатые еще в 50-х годах работы по усилению магнитостатических волн завершились созданием теории ферритового магнитостатического усилителя СВЧ, в

которой были показаны как возможности создания таких усилителей, так и ограничения из-за влияния спиновых волн, вызывающих в данных системах автоподавление усиления.

Дальнейшее развитие исследований было посвящено подробному изучению явлений нелинейного ферромагнитного резонанса (НФМР). В ходе работ по изучению НФМР получены ответы на такие вопросы, как условия энергетического равновесия при НФМР и возбуждения резонансных упругих колебаний, анизотропная автомодуляция НФМР, ультразвуковые колебания при НФМР, параметрическое взаимодействие ультразвуковых и магнитных колебаний в ферромагнетике и ряд других. В ходе этих работ открыто явление нелинейного взаимодействия спиновых и ультразвуковых волн, приводящего к излучению электромагнитных волн. Работы по НФМР обобщены в монографии, а накопленный экспериментальный опыт позволил предложить ряд оригинальных ферритовых приборов: усилителей СВЧ, модуляторов мощности, линий задержки и т. п.

Подробно исследовалось также распространение звука в ферро- и антиферромагнетиках и изучались вопросы возбуждения, распространения и усиления волн в структурах феррит-полупроводник (ФП). На основании этих исследований сделаны выводы по таким вопросам, как взаимодействие поверхностных магнитостатических волн с носителями заряда на границе этих сред, магнитоэлектрический резонанс в слоистой структуре ФП, анизотропия электродвижущей силы в структуре ФП при НФМР, резонансный гальваномагнитный эффект в структурах ФП, влияние электрического поля на распространение магнитостатических волн в структурах ФП и другие. В результате проведенных исследований показано, что как на структурах ФП, так и в многослойных системах феррит-пьезоэлектрик-полупроводник можно создать приборы для обработки информации.

Большой цикл работ был посвящен изучению процессов образования и распространения доменов в магнитных кристаллах и магнитооптическим системам, открывшим также большие возможности по созданию новой элементной базы для обработки информации. В настоящее время магнитоакустические и магнитооптические системы привлекают к себе все большее внимание специалистов в области создания радиоэлектронной аппаратуры.

Физика полупроводников, диэлектриков и сверхпроводников

Как уже указывалось ранее, в ИРЭ еще в 50-х годах были начаты работы в области изучения рекомбинационных процессов в полупроводниках. Эти исследования были связаны с запросами практики и касались введения в полупроводниковые материалы дозированных количеств примесей, что позволяло бы получать кристаллы с заранее за-

данными свойствами. Основными материалами, которые подвергались исследованиям, были германий и кремний.

Исследования ИРЭ были направлены на изучение влияния таких примесей, как золото, никель, медь, марганец, цинк в германии, и элементов III и V групп (индий, галлий, фосфор, сурьма, бор) в кремнии, на время жизни неравновесных электронов и дырок, в значительной степени определяющее чувствительность и инерционность полупроводниковых приборов.

В этом цикле была изучена способность примесных атомов захватывать электроны и дырки. Многие примеси (никель, золото и др.) создают в запрещенной зоне энергий не один, а несколько энергетических уровней. Получены соотношения, связывающие времена жизни с сечением захвата для случая примесей с несколькими энергетическими уровнями.

При анализе механизмов рекомбинации установлено, что в сильнолегированном германии рекомбинация не определяется фононными процессами, при которых энергия, освобождаемая при захвате носителя, передается колебаниям решетки, а доминирующим процессом становится ударная рекомбинация, при которой освобождаемая энергия передается другим носителям. Изучены процессы рекомбинации в случае заряженных центров, т. е. при наличии в них кулоновского притяжения и отталкивания, а также зависимость коэффициента захвата от температуры и роль туннельного эффекта при захвате носителей на отталкивающие центры. Исследование поведения примесей в германии оказало существенную помощь промышленности, и позднее (в 1972 г.) руководителю этих работ С. Г. Калашникову вместе с коллективом работников промышленности, внедривших в массовое производство германиевые диоды и диодные матрицы, была присуждена Государственная премия СССР.

Рекомбинационные процессы изучены также в кремнии, легированном элементами III и V групп. При этом в ИРЭ разработан новый метод получения чистого поликристаллического кремния путем термического разложения моносилана SiH_4 и бестигельной зонной кристаллизации. Этот метод, предложенный в конце 50-х годов, был затем использован в промышленных масштабах. В дальнейшем была разработана методика легирования кремния элементами III и V групп и изучены сечения захвата в интервале температур от 2 до 200 К. Результаты исследований позволили оценить этот материал с точки зрения его использования для регистрации ИК-излучения. В частности, выяснено, что кремний, легированный бором, является оптимальным материалом для изготовления охлаждаемых быстродействующих высокочувствительных и высокостабильных фотоспротивлений.

Исследования данных материалов показали также, что для них сечения захвата малы ($\sim 10^{-21}$ см²) и что процессы захвата электронов и дырок на нейтральные атомы элементов III и V групп в кремнии являются практически чисто излучательными (каждый акт захвата

сопровождается испусканием фотона). Проведенное исследование спектров рекомбинационного излучения показало возможность обнаружения в кремнии элементов III и V групп в концентрациях 10^{14} см^{-3} .

Проведенные опыты по нагреву электронов СВЧ-полем показали возможность значительного уменьшения времени жизни (например, для случая германия с медью в качестве примесного материала) в сильном электрическом поле. Этот вывод, так же как и объяснение зависимости туннельного просачивания горячих электронов сквозь кулоновский потенциальный барьер вокруг центра рекомбинации, играет большую роль в определении оптимальных режимов работы и параметров полупроводниковых приборов (лавинно-пролетные диоды и др.).

Как показали исследования, в полупроводниках с горячими электронами концентрация и подвижность носителей заряда сложным образом зависят от величины напряженности поля E и при определенных условиях дифференциальная проводимость dj/dE может оказаться отрицательной, при этом в полупроводнике могут возникнуть явления электрической неустойчивости. В частности, исследовано движение доменов рекомбинационного происхождения в германии, легированном медью. Проведено решение нелинейной задачи движения доменов. Работы в этом направлении показали, что такие домены можно использовать для генерирования электрических колебаний, подобно тому как используются движущиеся домены Ганна (но в данном случае на значительно более низких частотах).

В ИРЭ были выполнены также исследования явлений электрической неустойчивости при положительной дифференциальной проводимости, сопровождаемых возникновением рекомбинационных волн и соответствующими колебаниями тока. Исследования свойств рекомбинационных волн позволили предложить такие полупроводниковые приборы, как приемники светового излучения, устройства для точного (до 10^{-3} град) измерения и стабилизации температуры, чувствительное пороговое устройство для контроля и измерения магнитного поля, генераторы колебаний низкой частоты и преобразователи постоянного тока в переменный.

В 60-х годах Институтом начаты исследования конденсации неравновесных носителей заряда в полупроводниках, в ходе которых конденсированная фаза, состоящая из капель вырожденной электрон-дырочной плазмы, была впервые обнаружена экспериментально. Далее конденсированная фаза была подвергнута подробному изучению. В частности, применительно к ней исследованы такие вопросы, как спектр рекомбинационного излучения и энергетический спектр, зависимость интенсивности рекомбинационного излучения от уровня возбуждения и температуры, время жизни и квантовый выход рекомбинационного излучения, диффузия экситонов и электрон-дырочных капель, рассеяние света этими каплями и т. п. Этот цикл работ Института получил большое международное признание — руководитель этих работ

в ИРЭ Я. Е. Покровский был удостоен в 1975 г. премии Европейского физического общества.

Среди работ в области физики полупроводников и диэлектриков большое значение имеют работы по акустоэлектронике. Здесь учеными ИРЭ внесен существенный вклад как в разработку теоретических основ акустоэлектроники, так и в экспериментальные исследования. Из наиболее важных научных достижений следует отметить: идею использования поверхностных акустических волн и применения слоистых структур пьезоэлектрик–полупроводник в акустоэлектронике, что в значительной степени определило дальнейшее развитие этой области науки и техники; предсказание и экспериментальное обнаружение нового типа поверхностных акустических волн, получивших название волн Гуляева–Блюстейна; теоретическое и экспериментальное исследование явлений увлечения электронов акустическими волнами, приведшие к открытию четного акустоэлектрического эффекта и акустомагнетозлектрического эффекта, зарегистрированного в СССР в качестве открытия; теоретическое предсказание и экспериментальное обнаружение поперечного акустоэлектрического эффекта, который является основой для создания ряда важнейших акустоэлектронных устройств обработки информации; разработку теории и экспериментальные исследования нелинейных акустоэлектронных явлений, в частности открытие импульсной акустоэлектронной нелинейности; теоретическое предсказание и экспериментальное обнаружение и исследование ряда новых акустооптических явлений и др.

За разработку принципов акустоэлектроники руководителю этого научного направления в ИРЭ Ю. В. Гуляеву в 1974 г. присуждена Государственная премия СССР, а в 1979 г. — премия Европейского физического общества.

Исследовательские работы ИРЭ в области твердотельной электроники одной из задач имели продвижение в СВЧ-диапазон электромагнитных колебаний. Применительно к этой задаче еще в конце 50-х годов была выявлена возможность создания параметрических полупроводниковых диодов сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн для маломощных СВЧ-усилителей, вслед за этим были проведены исследования физических основ работы туннельных диодов и возможности их применений в приборах СВЧ. В последнее десятилетие выполнен цикл исследований объемных нелинейных свойств полупроводников (в основном арсенида галлия) в СВЧ-полях. Эти исследования показали возможность реализации в диапазоне СВЧ N-образной вольт-амперной характеристики полупроводникового диода из арсенида галлия и создания ряда приборов для генерации, усиления и преобразования частоты электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона.

Большое практическое значение имели работы ИРЭ в области фотоэлектрической спектроскопии, позволившие создать новый метод анализа химического состава малых количеств остаточных примесей в чистых и сверхчистых полупроводниковых материалах. Эти работы,

выполненные под руководством Т. М. Лифшица, позволили на практике реализовать чувствительность обнаружения примесей в германии $\sim 10^{-13}$ ат.% при теоретическом пределе этого метода 10^{-14} – 10^{-15} ат.%. Результаты этих работ нашли применение в заводских условиях при производстве полупроводниковых материалов.

В ИРЭ получены важные результаты в области исследований, направленных на разработку высокочувствительных примесных фотоприемников. В частности, впервые достигнута предельная фоточувствительность примесных фотоспротивлений на основе кремния, легированного элементами III группы: бором, галлием или индием. Выяснены физические причины ограничения быстродействия примесных фотоприемников. Экспериментально показано, что в кремнии, легированном примесями III группы, время фотоответа может достигать 10^{-10} с.

В 1971 г. в ИРЭ одновременно с Московским государственным педагогическим институтом им. В. И. Ленина были обнаружены новые состояния водородоподобных примесей в полупроводниках, аналогичные H^- -иону водорода. Показано, что эти состояния могут определять быстродействие и фоточувствительность примесного фотоприемника при низких температурах в условиях интенсивных подсветок и сильных электрических полей.

В последние годы в ИРЭ разработано примесное фотоспротивление на основе германия, легированного медью, обладающее рекордной фоточувствительностью в диапазоне длин волн 1,5–1,8 мкм; обнаружена высокая фоточувствительность эпитаксиальных пленок арсенида галлия в области длин волн 310–380 мкм; обнаружена при комнатной температуре фоточувствительность германия, легированного глубокими примесями, к излучению CO_2 -лазера; исследовано влияние электрического поля, температуры и концентрации примесей на спектр фотопроводимости.

Большой цикл теоретических и экспериментальных исследований посвящен изучению воздействия электромагнитного излучения на сверхпроводники, в том числе на джозефсоновские переходы. В ходе этих работ обнаружены новые явления и исследован их физический механизм: обнаружено явление одночастотной невырожденной параметрической регенерации; предсказано возникновение электрического поля в сверхпроводнике при наличии градиента температуры; установлен и экспериментально исследован механизм стимулированной СВЧ-излучением сверхпроводимости. Практическим результатом этих работ явилось создание ряда высокочувствительных приемных, смесительных и усилительных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, о параметрах которых можно судить по следующим примерам: широкополосный приемник на спектральную область 4–0,3 мм имеет предельную чувствительность по мощности 10^{-14} Вт/Гц^{1/2}, по температуре 0,01 К/Гц^{1/2}; одночастотный невырожденный усилитель трехсантиметрового диапазона при коэффициенте усиления ~ 20 дБ имеет шумовую температуру 200 К; модуляционный супер-

гетеродинный радиометр продемонстрировал чувствительность 0,13 К при полосе УПЧ 400 МГц и постоянной времени НЧ-фильтра 1 с. Результаты проведенных в ИРЭ исследований в области приема электромагнитных излучений успешно используются в науке и технике.

Микроэлектроника

Работы в области микроэлектроники начали развиваться в ИРЭ под руководством М. И. Елинсона с середины 60-х годов. К числу наиболее важных исследований по этому направлению относятся работы по экспериментальному обнаружению размерного квантового эффекта. В результате исследований, проводившихся на тонких пленках висмута, обнаружены как размерное квантование спектра носителей тока, так и ряд новых физических явлений, присущих полуметаллам в этом состоянии. Даны рекомендации по практическому использованию полученных закономерностей. Обнаружение размерного квантового эффекта официально зарегистрировано в СССР в качестве открытия.

Среди других результатов по пленочной микроэлектронике необходимо отметить создание нового физического представления о процессах, протекающих в пленочных МДП-триодах, разработку нового метода исследования границ раздела в МДП-структурах (метод ТРК), получение новых данных о выявлении «замороженной» фотопроводимости в неупорядоченных пленках.

В ходе этих работ было открыто и исследовано явление аномально высокой чувствительности тока в диодах Шоттки к давлению, очень скоро получившее практическое применение для клавишной и других областей тензочувствительной техники.

Практически важным разделом работ по данному направлению было открытие и исследование эффекта переключения тока с памятью, основанного на явлении реверсивного массопереноса материала электродов. Созданные на этом принципе переключающие элементы весьма перспективны для применения в вычислительной технике. Практическое применение получает также разработанный в ИРЭ оптический метод неразрушающего контроля изделий микроэлектроники, основанный на измерении псевдоугла Брюстера в области плазменных частот полупроводников.

В ИРЭ выполнены пионерские исследования оптоэлектронных явлений, направленные на создание новых систем обработки информации. В частности, исследована и показана возможность использования для обработки информации (на низких частотах) электрооптических эффектов в полупроводниках — сегнетоэлектриках типа SbSI (явление поляризации света, движение областей сегнето- и парафазы под действием электрического поля и др.). Позже был выполнен цикл исследований на кристаллах ниобата бария и стронция (НБС), обла-

дающих среди других подобных материалов наибольшей величиной электрооптического эффекта.

При исследовании кристаллов НБС выяснены их диэлектрические и сегнетоэлектрические свойства, открыта и изучена анизотропная (по поляризации) дифракция света на слоистых структурах, предложены и исследованы дискретные дефлекторы света дифракционного типа и соответствующие оптоэлектронные логические элементы на их основе.

Возможность глубокой амплитудной и фазовой модуляций света, необходимых при оптоэлектронной обработке информации, показана исследованиями электропоглощения и электродисперсии света в экситонной области спектра полупроводников.

Эти исследования позволили выявить реверсивную оптическую среду (слоистая система: металл–пленка полупроводника с экситонными линиями поглощения диэлектрик–металл), весьма перспективную для использования в системах оперативной памяти. Работы ИРЭ в области создания микроэлектронных и оптоэлектронных элементов для обработки информации привели к разработке новой концепции создания высокоэффективных обучающихся систем обработки информации.

Квантовая радиофизика

Основными направлениями научно-исследовательских работ в области квантовой радиофизики являлись:

- квантовые устройства стабилизации частоты;
- изучение явлений парамагнитного резонанса;
- поиск и исследование новых материалов для квантовой электроники.

В результате исследований вопросов стабилизации частоты создана теория квантовых генераторов с оптической накачкой на парах рубидия и экспериментально показана возможность получения таких генераторов с кратковременной относительной нестабильностью частоты порядка 10^{-13} . Работы ИРЭ в этом направлении, выполненные под руководством Е. Н. Базарова, нашли широкое применение в промышленности. За эти работы Е. Н. Базаров в 1977 г. удостоен звания лауреата Государственной премии СССР.

В области изучения явлений парамагнитного резонанса следует отметить два результата первостепенной важности: разработку первых в СССР квантовых парамагнитных усилителей, получивших успешное применение уже в первых экспериментах по радиолокации планет, и исследование роли спин-спинового резервуара в парамагнитном резонансе и динамической поляризации ядер. Обе работы получили практическое применение, а ведущим специалистам, участвовавшим в создании квантовых парамагнитных усилителей, М. Е. Жаботинскому и А. В. Францессону в 1976 г. присуждена Государственная премия СССР.

В области создания новых лазерных материалов заслуживают особую отметку работы по созданию и изучению ряда эффективных составов фосфатных стекол для лазерных систем. В частности, разработаны и внедрены в промышленность активированные неодимом (Nd^{3+}), иттербием (Yb^{3+}) и эрбием (Er^{3+}) лазерные стекла с длинами волн генерации 1,06 и 1,54 мкм. Эти стекла сочетают хорошие физико-химические, термооптические и генерационные свойства. Так, например, активные лазерные элементы из фосфатных стекол, активированных Nd^{3+} , обеспечивают параметры генерации, близкие к параметрам лазеров на кристаллах алюмоиттриевого граната, — на цилиндрическом активном элементе 8×100 мм при частоте следования импульсов 10 Гц энергия генерации превышает 0,5 Дж в моноимпульсном режиме и 1 Дж в режиме свободной генерации. Соответствующие величины КПД равны 1 и 1,5%. При этом следует иметь в виду, что разработанные фосфатные стекла значительно более дешевы, чем другие активные материалы для лазеров.

Работы ИРЭ в области квантовой электроники велись и по ряду других направлений. Так, в 1966 г. ИРЭ совместно с Институтом общей неорганической химии АН СССР предложена и изучена неорганическая лазерная система на основе смеси оксихлорида фосфора и четыреххлористого олова с примесью активного иона трехвалентного неодима ($\text{POCl}_3 + \text{SnCl}_4 \cdot \text{Nd}^{3+}$). Эта лазерная жидкость отличается низкой пороговой энергией и высоким значением энергии генерации на единицу объема активного вещества. На этой лазерной системе получена энергия генерации 350 Дж. Спектрально-люминесцентные исследования показали, что для нее характерно слабое концентрационное тушение, а также позволили определить структуру активного центра неодима в этой системе.

В результате исследования параэлектрического резонанса в монокристаллах, содержащих туннелирующие электродипольные ионы, в ИРЭ обнаружен и исследован параэлектрический резонанс нецентральных заряженных и нейтральных примесей. Релаксационные процессы в параэлектриках исследовались методом динамической восприимчивости. Этот метод позволил разделить релаксационную и изолированную восприимчивость параэлектрических примесей, проявляющих параэлектрический резонанс. Установлено, что изолированная восприимчивость нелинейна по электрическому полю и малоинерционна. Она наблюдается вплоть до частоты туннелирования (десятки гигагерц).

Кристаллофизика

Научно-исследовательские работы ИРЭ в области физики полупроводников, квантовой электроники, физики магнитных явлений, эмиссионной электроники, оптоэлектроники и по другим направлениям, требующим поиска и создания новых материалов, определили необхо-

димось развития нового научного направления — кристаллофизики и связанных с ней технологических работ. По этому направлению в 60-х и 70-х годах в ИРЭ выполнено большое количество исследований и усовершенствований технологических процессов, обеспечивших развитие всех научно-исследовательских работ Института в области электроники. Здесь имеется возможность привести только примеры наиболее важных результатов, полученных в этой области. Так, для обеспечения исследований в области физики полупроводников разработана технология получения эпитаксиальных слоев арсенида галлия особой чистоты (газотранспортным методом) с концентрацией электронов порядка 10^{13} – 10^{14} см^{-3} и подвижностью при 77 К порядка $1,6 \cdot 10^5$ $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Этот материал обеспечил выполнение основополагающих исследований неустойчивостей в полупроводниках с горячими электронами. Столь же уникальной является разработанная в ИРЭ методика получения монокристаллов особо чистых узкозонных полупроводников $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ с содержанием сурьмы в пределах 8,5–23 ат.% — с концентрацией электронов порядка $2 \cdot 10^{13}$ см^{-3} и подвижностью при температуре 4,2 К порядка 10^7 $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Впервые в СССР была разработана методика получения монокристаллов нового узкозонного полупроводника PtSb_2 .

В ИРЭ был предложен новый способ получения монокристаллических пленок полупроводникового сегнетоэлектрика — сульфоиодида сурьмы (SbSI) из расплава в малом промежутке, образованном неориентирующими подложками (стекло, кварц) с использованием направленного теплоотвода в сочетании с колебательным температурным режимом кристаллизации. Данный способ позволил впервые получить монокристаллические пленки, на которых были обнаружены как фазовый переход, так и пироток (аморфные и поликристаллические пленки этим свойством не обладают). Предложенный в ИРЭ метод позволил получить и новое сегнетоэлектрическое соединение $\text{SbS}_{0,8}\text{O}_{0,2}\text{I}$ (аналог SbSI) с температурой фазового перехода 75–80° С. Достаточно высокая температура фазового перехода, значительный коэффициент электро-механической связи ($\sim 0,3$ при 50° С), большое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 20\,000$) открывают перед этим материалом большие возможности для внедрения в практику.

Разработкой большого практического значения является также метод получения структурно совершенных монокристаллических пленок сульфида кадмия на подложках из различных полупроводниковых и диэлектрических материалов. На этих пленках созданы высокоэффективные эпитаксиальные преобразователи СВЧ-диапазона для акусто-электронных устройств (потери на пьезоэлектрическое преобразование 10–15 дБ при относительной полосе частот 60–80%). Для создания активных акустоэлектронных устройств разработана и освоена методика получения тонких (~ 500 Å) полупроводниковых пленок сурьмянистого индия на пьезоэлектрических кристаллах с высокими электрофизическими параметрами (концентрация свободных носителей заряда

$(2 \div 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижность $1500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), что позволило впервые реализовать реальное усиление радиосигнала в непрерывном режиме в монокристаллическом акустоэлектронном усилителе. Ряд теоретически предсказанных в ИРЭ акустоэлектронных эффектов обнаружен на фоточувствительных пленках селенида кадмия, полученных на основе оригинальной методики.

В ИРЭ разработан весьма эффективный метод консервации атомной структуры поверхности полупроводников типа $A^{III}B^V$ защитными слоями, позволяющий сохранять поверхности полупроводниковых кристаллов с заданными физическими и химическими свойствами. Из других работ по получению новых полупроводниковых и диэлектрических материалов следует отметить впервые разработанную в ИРЭ методику получения пиролитических пленок окислов переходных металлов (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn), обладающих специфическими оптическими и электрическими свойствами. В частности, получены пленки двуокиси ванадия с резким изменением свойств в миллиметровом диапазоне длин волн при фазовом переходе из полупроводящего состояния в металлическое. Наличие такого перехода позволяет использовать подобные пленки в различных СВЧ-устройствах, например в ограничителях мощности и визуализаторах излучения. Методом пиролитического синтеза с использованием металлоорганических соединений галлия, алюминия, цинка и арсина получены в едином технологическом цикле гетеро- и автоэпитаксиальные структуры $\text{GaP-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs(P)}$ и GaAs-GaAs(P) и на их основе созданы фотокатоды, работающие в полупрозрачном варианте и на отражение. Впервые этим же методом получены эпитаксиальные гетероструктуры GaP-CdS-CdSe с высоким удельным сопротивлением рабочего слоя CdSe для создания на этих структурах динамических транспарантов.

В ИРЭ были разработаны методы выращивания таких монокристаллов, как ниобат бария-стронция, германат и силикат висмута, гадолиний-галлиевый гранат, и эпитаксиальных пленок сложных висмутсодержащих редкоземельных ферритов-гранатов. Изучение свойств этих материалов позволило получить ряд важных решений в области создания акустоэлектронных, магнитооптических и электрооптических устройств.

В работах по кристаллофизике большая роль принадлежит ведущим специалистам в этой области: Я.С. Савицкой, В.Б. Кравченко, В.Ф. Дворянкину.

Автоматизация научных исследований

Сложность и объем исследований, выполняемых Институтом, определили необходимость широкого применения средств современной вычислительной техники и автоматизации эксперимента. Для решения этих задач было создано специальное подразделение — необходимо было провести анализ и моделирование процесса научных исследо-

ваний, разработать и создать автоматизированные системы научных исследований (т. е. их архитектуру, программирование, организацию), разработать и создать технические средства автоматизации (аппаратуру сопряжения, специальные периферийные устройства, элементную базу и т. п.), разработать методы планирования и проведения автоматизированного эксперимента. Все эти вопросы были проработаны как по отношению к институту общефизического профиля, так и применительно к конкретным работам ИРЭ. В настоящее время в Институте используются шесть систем автоматизации, созданных на базе аппаратуры КАМАК.