

РАДИОФИЗИКА В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ ЗА 60 ЛЕТ

(1917—1977 гг.)

Начало исследовательской работы в области радиотехники и радиофизики в СССР было положено в 1918 г. организацией Нижегородской радиолaborатории (НРЛ), положение о которой было подписано В. И. Лениным. НРЛ послужила примером того, как можно эффективно использовать специалистов, имевшихся в России до Октябрьской революции. В высшей школе в первые годы после Великой Октябрьской революции преподавание и исследовательскую работу вели почти исключительно ученые, сложившиеся в дореволюционное время.

В дореволюционной России исследовательская работа в области физики велась практически только на кафедрах вузов, главным образом университетов. В области радиофизики и электроники тогда были выполнены исследования, правда, немногочисленные, но стоявшие на уровне мировой науки. К ним следует отнести работы А. Г. Столетова по фотоэлектронной эмиссии, А. А. Эйхенвальда по изучению магнитных полей конвекционных токов и токов смещения, В. А. Ульянина, построившего первый вентиляльный селеновый фотоэлемент. В учебном заведении (минные офицерские классы) работал и А. С. Попов.

Особо следует выделить П. Н. Лебедева, создателя первой в России научной физической школы, сложившейся в Московском университете. Из лебедевской школы вышел ряд работ по генерации коротких электромагнитных волн, по пондеромоторному воздействию волн различной природы. Школа П. Н. Лебедева была в значительной степени научной радиофизической школой.

Уже в первые годы после Октябрьской революции одновременно с организацией сети научных институтов Академии наук и промышленности создавались исследовательские институты и лаборатории в вузах, сначала в Москве и Ленинграде, затем в Саратове, Горьком, Томске и других городах. В Московский университет возвратились сотрудники П. Н. Лебедева, покинувшие его вместе со своим учителем в 1911 году (В. К. Аркадьев, В. И. Романов и др.). Уже в первой половине 20-х годов ими и их сотрудниками был выполнен ряд работ по генерации кратчайших электромагнитных волн («массовый излучатель» А. А. Глаголевой-Аркадьевой), по исследованию поведения ферромагнетиков в полях высокой частоты и по ламповым генераторам СВЧ-колебаний.

Работы в области теории колебаний начали быстро развиваться с приходом в МГУ Л. И. Мандельштама (1925 г.), вокруг которого собралась большая группа талантливых учеников.

В начале 20-х годов подготовка радиоспециалистов, сочетавших технические знания и фундаментальное физическое образование, была развернута в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ). В ЛПИ велись исследования в области генерации СВЧ-колебаний (Д. А. Рожанский), теории колебаний и параметрических машин (Н. Д. Палпалекси), интерференционных методов измерения расстояний.

В Саратовском университете (СГУ) начало исследованиям в области радиофизики было положено одним из воспитанников лебедевской

школы К. А. Леонтьевым. В Горьковском университете (ГГУ) и исследовательском физико-техническом институте университета (ГИФТИ) исследовательская работа и подготовка специалистов в области радиофизики и электроники началась с 1931 г. С 1936 г. систематические ионосферные наблюдения велись в Томске.

В настоящее время коллективы специалистов в области радиофизики и электроники работают на радиофизических специальностях и факультетах университетов, в технических вузах, исследовательских институтах и лабораториях во многих городах СССР. За 60 лет, прошедших после Октябрьской революции, ими были получены значительные научные результаты.

Радиофизика и электроника в вузах развивались в тесном взаимодействии с научными учреждениями Академии наук и промышленности. Широко практиковалась совместная разработка, выполнение вузами исследований по договорам, участие сотрудников АН и работников промышленности в преподавании и т. п. Значение таких связей для исследовательской работы в вузах и преподавании трудно переоценить.

Ниже дается краткий обзор исследований в области радиофизики, выполненных в вузах за 60 лет.

Физика колебаний и волновых процессов. Стремительное развитие нелинейной теории колебаний в 20-х годах в немалой степени стимулировалось нуждами радиотехники и радиосвязи. Если до 1930 года основными «колебательными центрами» были Германия (Баркгаузен) и Голландия (Ван-дер-Поль), то уже в начале 30-х годов ведущая роль переходит к Московскому университету, в первую очередь, благодаря научной и педагогической деятельности Л. И. Мандельштама и его учеников, особенно А. А. Андропова, и затем воспитанников этой школы следующего поколения. Особенно ясно огромный вклад школы Л. И. Мандельштама в МГУ и сформировавшейся в 30—40 годах школы Андропова в Горьковском университете в создание нелинейной теории колебаний виден с позиций современной науки. Именно в этих двух университетах сложилась особая колебательная культура, включающая в себя выработку «нелинейного физического мышления», построение общих методов и основных элементарных моделей, которая привела к общепризнанно высокому уровню исследований по теории нелинейных колебаний и теории нелинейных волн в Советском Союзе.

Многие современные разделы теории нелинейных колебаний и волн опираются на фундаментальные результаты, полученные в 30—40 годах в Москве и Горьком. Напомним основные из них: создание теории параметрических генераторов и ее экспериментальная проверка, обоснование метода Ван-дер-Поля и расширение его применительно к системам с меняющимися параметрами и другим задачам, исследование переходных процессов, создание теории автоколебаний для систем с одной степенью свободы, теория захватывания частоты автогенератора внешней периодической силой, теория разрывных колебаний, статистическое описание динамических систем, теория флуктуаций в нелинейных системах, развитие качественной теории нелинейных дифференциальных уравнений на плоскости, введение понятия грубости (структурной устойчивости) динамических систем, развитие и последовательное применение к различным задачам нелинейных колебаний метода точечных преобразований Пуанкаре. Это лишь основные, да и то далеко не все направления физики колебаний, заложенные Мандельштамом и Андроновым в предвоенные годы. Они нашли свое отражение в книге А. А. Андропова, А. А. Витта, С. Э. Хайкина «Теория колебаний» (1937 г.) и лекциях

Л. И. Мандельштама по теории колебаний (изданных в 1947 г.). В послевоенные годы интенсивно развивалась теория автоматического регулирования, которая стала одной из основных областей приложения теории колебаний. Очень плодотворным здесь оказалось применение теории точечных преобразований. Были решены задача Мизеса и задача об автопилоте, полностью решена классическая задача Вышнеградского, создана теория часов, сделан существенный вклад в теорию электрических машин. В МГУ интенсивно развивалась строгая колебательная теория электронных приборов.

В последующие годы не раз подтвердилась плодотворность мандельштамовской идеи о «колебательной взаимопомощи» различных областей науки*. К началу 60-х годов благодаря созданию новых нелинейных материалов, построению мощных источников электромагнитных и звуковых волн и продвижению в диапазон очень высоких частот стали возникать новые разделы физики — нелинейная акустика, нелинейная оптика, нелинейные процессы в плазме и др. В них, а также в классической газо- и гидродинамике было поставлено большое число нелинейных колебательных задач. По существу на их основе начала складываться новая область теории колебаний — теория нелинейных волн. Бурное развитие этой области в СССР, во многом опережающее зарубежное, основывалось уже на прочном фундаменте теории колебаний, заложенном Мандельштамом и Андроновым. Была построена теория генерации гармоник в нелинейных средах, построена теория и созданы параметрические генераторы света, решен ряд проблем динамической теории ОКГ, построена теория комбинационных лазеров, разработаны и математически обоснованы асимптотические методы для анализа волновых процессов, построена теория автоколебаний одномерных распределенных систем, развита теория распространения модулированных волн в нелинейных средах.

Не останавливаясь на результатах еще не вполне завершенных исследований, отметим лишь, что теория нелинейных волн находит сейчас все более широкое применение в динамике атмосферы и океана, нелинейной акустике, теории турбулентности, распространении волн в ионосфере и ряде других проблем.

Статистическая радиофизика. Можно сказать, что статистическая радиофизика берет свое начало от пионерской работы 1933 г. А. А. Андропова, А. А. Витта и Л. С. Понтрягина (тогда сотрудников МГУ), посвященной статистическому описанию поведения динамической системы, находящейся под действием случайных сил. Основное развитие это научное направление получило в послевоенные годы и было стимулировано развитием радиолокации, радионавигации и радиоастрономии.

В настоящее время статистическая радиофизика является одним из важнейших разделов радиофизики. Область ее применения непрерывно растет, включая в себя весьма разнообразные научно-технические проблемы.

Ученые вузов страны внесли чрезвычайно существенный вклад в развитие статистической радиофизики. В первую очередь здесь следует выделить коллективы, работающие в Московском и Горьковском университетах.

* Например, взаимодействие синусоидальной волны и ее гармоники в нелинейной среде впервые было исследовано в связи с анализом процессов в радиотехнических устройствах — линиях передачи с нелинейной погонной емкостью (или индуктивностью). Решение же возникшей несколько лет спустя в нелинейной оптике проблемы удвоения частоты лазерного излучения опиралось на уже имеющиеся результаты и сложившиеся к тому времени представления о взаимодействии волн в нелинейных средах с дисперсией.

Исследования флуктуаций в автоколебательных системах и связанные с ними вопросы о монохроматичности автоколебаний, стабильности частоты и точности ее измерения были начаты в 1938 г. в Горьком. Г. С. Гореликом (ГГУ) были выяснены физические механизмы уширения линии автогенератора и введены понятия естественной и технической ширины линий. Эти результаты явились основополагающими для дальнейших работ по флуктуациям в автоколебательных системах. Последующие работы этого направления связаны как с исследованиями флуктуаций в системах различного типа, так и с разработкой общих вопросов теории случайных процессов. В ГГУ исследовались флуктуации в клистродах, мазерах, лазерах и других типах генераторов.

Существенный этап в изучении флуктуационных явлений в автоколебательных системах связан с работами сотрудников МГУ. Здесь же были исследованы низкочастотные шумы и флуктуации в полупроводниковых устройствах, магнитных пленках, ферритах, а также статистические явления в автоколебательных системах с диффузными связями. Следует отметить также работы по изучению статистических характеристик шумов в полупроводниковых и магнитных материалах, выполненные в Московском физико-техническом институте (МФТИ), по флуктуациям в генераторах и усилителях СВЧ (ЛПИ), работы по исследованию стабильности многочастотных автоколебательных систем и изучению флуктуаций в различных полупроводниковых радиоэлектронных системах по исследованию флуктуаций в умножителях частоты (Московский энергетический институт — МЭИ), по изучению характеристик фликкер-шумов в резисторах и полупроводниках (Вильнюсский университет) и флуктуаций в высокочастотных кварцевых транзисторных генераторах (Калининградский университет). Широкие исследования по созданию малозумящих полупроводниковых устройств СВЧ проведены в Московском государственном педагогическом институте (МГПИ).

Существенные успехи были достигнуты также в исследованиях флуктуационных явлений при распространении волн в случайно неоднородных средах в приложении к акустике, оптике и радио (МГПИ, Научно-исследовательский радиофизический институт), а также в исследованиях по статистическим явлениям в нелинейных средах (МГУ и ГГУ).

Следует особо отметить те работы ученых вузов, которые оказали большое влияние на общее развитие статистической радиофизики и определяют ее современное состояние. Это работы, касающиеся общих вопросов теории случайных процессов, теории флуктуационных явлений в колебательных и автоколебательных системах, теории случайных полей, теории флуктуационных явлений при распространении волн, теории тепловых флуктуаций и др., и работы по теории флуктуаций в радиотехнике, теории условных марковских процессов и их применению к задачам оптимального управления, теории информации и по исследованию флуктуаций в неравновесных системах, выполненные в МГУ.

Распространение радиоволн. Физика ионосферы. В Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) при Томском университете (ТГУ) в 1936 г. была создана первая советская ионосферная станция и начаты регулярные ионосферные наблюдения. Позднее (1945—50 годы) исследования распространения радиоволн и процессов в ионосфере начали проводиться в ряде вузов. Центры таких исследований за последние 20 лет сформировались в Горьковском, Ростовском, Харьковском и Иркутском университетах.

В Ленинградском университете (ЛГУ) на развитие работ по распространению радиоволн определяющее влияние оказали работы

В. А. Фока, выполненные в 1940—50 годах. Эти исследования были связаны с решением фундаментальных задач распространения радиоволн над земной поверхностью. Проблемы распространения радиоволн заняли доминирующее положение на созданной в 1947 г. кафедре радиофизики ЛГУ. Наибольшую известность получил выполненный в ЛГУ цикл работ по исследованию распространения радиоволн СДВ-диапазона.

В МГУ основным направлением был анализ влияния неоднородностей на распространение радиоволн в тропосфере и ионосфере.

В ГГУ и НИРФИ, начиная с 1945 г., был выполнен большой цикл работ по физике и динамике ионосферы и ионосферному распространению радиоволн. Были исследованы структура регулярной и неоднородной ионосферы и зависимости ее основных параметров от времени суток, сезона солнечной активности на различных геомагнитных широтах, включая полярные и экваториальные области. Значительные результаты были получены по спектру ионосферных неоднородностей и по физике нижней ионосферы (*D*-область) методом частных отражений. В последние годы в НИРФИ сложилось новое направление ионосферных исследований — искусственные возмущения ионосферы полями мощных наземных передатчиков.

В НИРФИ была создана теория атмосферного поглощения миллиметровых и субмиллиметровых волн, подтвержденная точными измерениями. Исследования по атмосферному распространению радиоволн сантиметрового диапазона привели к созданию нового метода дистанционного определения атмосферных профилей влажности и температуры.

Значительно расширились, особенно в последние годы, работы по физике ионосферы и ионосферному распространению радиоволн в Харькове. В Харьковском университете (ХГУ) были проведены исследования по анализу флуктуационных характеристик ионосферы. В Харьковском политехническом институте (ХПИ) создана современная установка по изучению ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн.

В Томске (СФТИ) изучались вопросы далекого тропосферного распространения волн УКВ-диапазона. В области ионосферных исследований здесь в течение многих лет изучались суточные и сезонные изменения области *E* ионосферы. В Ростовском университете (РГУ) основные усилия были направлены на изучение характеристик спорадического слоя *E* и поглощения в ионосфере. В Иркутском университете интенсивно разрабатываются вопросы моделирования области *F* ионосферы, актуальные для коротковолновой связи.

Физика плазмы. Здесь следует прежде всего отметить выдающуюся роль А. А. Власова (МГУ), который в конце 40-х годов предложил метод описания коллективных взаимодействий заряженных частиц в плазме путем введения самосогласованного электромагнитного поля в кинетическое уравнение. Полученное уравнение, обычно называемое уравнением Больцмана — Власова, лежит в основе современной физики плазмы. Исследования по теории плазмы были продолжены в МГУ, где была разработана получившая широкое признание статистическая теория неравновесных процессов.

В конце 40-х годов в Горьковском университете начались работы в области теории распространения и излучения волн в плазме. Были исследованы особенности излучения электрона в магнитоактивной плазме, линейное взаимодействие волн в неоднородной плазме, гирорезонансное и черенковское поглощение; эти исследования легли в основу кинетической теории распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме. Несколько позднее в НИРФИ было проведено исследование процессов конверсии плазменных волн в электромагнитные

излучение, в частности, за счет слияния продольных волн в поперечную волну. Эти работы положили начало широкому изучению трехволнового взаимодействия в плазме.

В последние годы в Горьком выполнен цикл важных теоретических и экспериментальных исследований нелинейных электромагнитных явлений в плазме. Начало этому циклу положили фундаментальные работы по изучению усредненных пондеромоторных сил и их использованию для локализации и ускорения плазмы высокочастотными полями, заложившие основы описания динамических нелинейных процессов в плазме. Хорошо известны работы по теории теплого и стрикционного самовоздействия и взаимодействия электромагнитных волн в плазме, по влиянию нелинейных процессов на эффективность резонансного бесперехватного поглощения электромагнитных волн в плазме, а также выполненные впервые эксперименты по самофокусировке волн в плазме и просветлению непрозрачной плазмы интенсивным излучением.

В МГУ и в НИРФИ выполнены исследования коллективных эффектов взаимодействия волн и частиц в магнитосферной плазме. Полученные результаты позволили построить теорию динамики радиационных поясов Земли и обосновать циклотронный механизм генерации очень низкочастотных (ОНЧ) излучений в магнитосфере.

В ХГУ были выполнены получившие большую известность исследования по теории флуктуаций в плазме и рассеянию волн на флуктуациях плазмы. Другим направлением в ХГУ было изучение процесса проникновения волн в ограниченную плазму и исследование плазменных волноводов.

Плазменная тематика принадлежит к числу ведущих и в Киевском университете (КГУ), где широко исследовались процессы в низкотемпературной плазме, экспериментально изучалась релаксация электронных потоков в плазме, а также выполнен цикл экспериментальных исследований короткоживущей импульсной плазмы.

Радиоастрономия. Наиболее значительные результаты в области радиоастрономии были получены в Государственном астрономическом институте им. Штернберга при Московском университете (ГАИШ), Ленинградском университете и в НИРФИ.

Основное направление радиоастрономических исследований в Ленинградском университете — наблюдение радиоизлучения Солнца на сантиметровых волнах. Полученные ими результаты позволили установить общий вид частотного спектра медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения.

В отделе радиоастрономии (ГАИШ) была развита теория синхротронного излучения дискретных источников, в частности, было объяснено излучение Крабовидной туманности и предсказано обнаруженное позднее вековос изменение потока радиоизлучения источника Кассиопея-А. Там же была развита теория излучения водорода в линии 21 см и предсказаны возможности исследования радиоизлучения молекул в линиях.

Благодаря исследованиям, выполненным в ГАИШ, была создана более или менее полная картина явлений в солнечной атмосфере, позволившая глубже понять различные особенности радиоизлучения Солнца. Следует также отметить большой цикл исследований межзвездной среды в линии 21 см, где было подробно изучено искривление межзвездного газа и его распределение. Там же была предсказана возможность обнаружения радиорекомбинационных линий, которые были экспериментально обнаружены. Сотрудники ГАИШ принимали участие в создании

радиотелескопа системы Ратан-600 и в ряде работ, выполненных на искусственных спутниках Земли и космических ракетах.

Экспериментальные работы по радиоастрономии были начаты в Горьковском университете вскоре после окончания Отечественной войны. Была разработана радиоастрономическая аппаратура и начаты наблюдения радиоизлучения Солнца, Луны и дискретных источников. В последующие годы сотрудники НИРФИ провели измерения радиоизлучения Луны; полученные ими результаты позволили определить интегральные характеристики лунной поверхности. Были выполнены исследования галактического радиоизлучения в миллиметровом диапазоне; ведется изучение солнечного радиоизлучения на сантиметровых и дециметровых волнах и по программе «службы Солнца». Проведены исследования спектра и поляризации космического радиоизлучения.

Исследования в области теоретической радиоастрономии и физики космической плазмы в Горьком были начаты в 50-х годах по инициативе В. Л. Гинзбурга и продолжаются до настоящего времени под его руководством. Были выполнены работы по исследованию и обоснованию синхротронного механизма распределения космического радиоизлучения. Проведено изучение механизмов генерации радиоизлучения в космической плазме; эти исследования позволили заложить основы теории происхождения солнечного радиоизлучения.

Квантовая радиофизика и нелинейная оптика. Идея использования эффекта стимулированного излучения для усиления электромагнитных колебаний и волн принадлежит В. А. Фабриканту (1939 г.). Им и его сотрудникам (МЭИ) была подана авторская заявка на новый способ усиления электромагнитного излучения в диапазоне от ультрафиолетовых до радиоволн. В этой заявке предлагались конкретные способы создания в среде состояний с инверсной заселенностью уровней.

Как самостоятельное научное направление квантовая радиофизика оформилась в середине 50-х годов. С этого времени исследования по квантовой радиофизике ведутся во многих вузах.

Исследования парамагнитных кристаллов, сыгравшие значительную роль в деле создания квантовых парамагнитных усилителей, были проведены в Научно-исследовательском институте ядерной физики при МГУ.

Исследования эффектов, имеющих место при ферромагнитном резонансе в монокристаллах феррита, которые проводились в Киевском университете, привели к созданию умножителей частоты, а также перестраиваемых усилителей и генераторов диапазона СВЧ. В ГГУ и НИРФИ были проведены экспериментальные исследования молекулярных генераторов и, в частности, создан мазер миллиметрового диапазона на формальдегиде. Квантовые генераторы субмиллиметрового диапазона с оптической накачкой разработаны и исследованы в ХГУ.

Весьма перспективным классом активных сред для лазеров являются пары химических элементов. Работы ученых Ростовского университета выявили особенности процессов, протекающих в таких активных средах, и позволили существенно расширить список генерирующих элементов и линий.

В МГУ был создан новый класс перестраиваемых генераторов ультрафиолетового диапазона — лазеры на органических сцинтилляторах; там же были развернуты фундаментальные исследования по проблеме гамма-лазеров (Р. В. Хохлов).

Второй большой круг вопросов, в разработку которого ученые вузов внесли существенный вклад, связан с динамикой излучения квантовых генераторов. Первые работы по устойчивости стационарной генерации

были выполнены в МГУ. Изучению природы и характера нестационарных режимов квантовых генераторов и созданию динамической теории лазера посвящены работы, выполненные в НИРФИ. Основные закономерности генерации твердотельных лазеров с кольцевым и со сверхдлинным линейным резонаторами выявлены в экспериментах, поставленных в НИИЯФ. В ЛПИ получен ряд результатов, касающихся синхронизации мод в кольцевых твердотельных лазерах. Теоретические и экспериментальные исследования отдельных вопросов динамики лазеров на твердом теле ведутся в Томском институте автоматизированных систем управления и радиоэлектроники.

Вопросы динамики излучения инжекционных полупроводниковых лазеров, методы их модуляции и регистрации излучения с большим временным разрешением разрабатывались в МГУ. Здесь же были созданы полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. Работы в области полупроводниковых лазеров и в ряде других направлений квантовой электроники ведутся в Московском инженерно-физическом институте (МИФИ).

Существенный вклад учеными вузов внесен в изучение проблемы флуктуаций излучения квантовых генераторов. В ГГУ рассмотрены вопросы теории флуктуаций в молекулярных генераторах. Фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты в области флуктуаций газовых лазеров получены в НИРФИ и МГУ. Исследования чувствительности квантовых усилителей оптического диапазона ведутся в МФТИ.

Необходимо также отметить пионерскую работу по применению лазеров в химии и проблеме разделения изотопов (МГУ).

Создание лазеров стимулировало развитие исследований процессов взаимодействия и самовоздействия световых волн, связанных с нелинейностью характеристик веществ в поле сильного излучения. Ученые вузов внесли существенный вклад в создание и развитие возникшей в результате этих исследований новой области науки — нелинейной оптики. Так, в основополагающих работах, выполненных в МГУ, были впервые рассмотрены как некоторые основные закономерности взаимодействия световых волн, так и возможные применения этих процессов для преобразования частоты когерентного светового излучения. В частности, были предложены новые для оптики параметрические генераторы света, позволяющие плавно перестраивать частоту излучения.

В начавшихся затем широких исследованиях параметрического взаимодействия световых волн, процессов вынужденного рассеяния, самофокусировки и самовоздействия света значительное место занимают работы ученых Московского, Горьковского, Киевского и Вильнюсского университетов и связанных с ними исследовательских институтов. Проведенные в МГУ исследования привели, в частности, к открытию явления параметрической суперлюминесценции. Широкие теоретические и экспериментальные исследования процессов параметрического взаимодействия, вынужденного рассеяния, самофокусировки и самовоздействия световых пучков и импульсов, проведенные в МГУ, НИРФИ, Вильнюсском университете, привели к созданию весьма полной картины протекания этих процессов. Изучение особенностей четырехфотонного резонансного параметрического взаимодействия, проведенное в МГУ и ГГУ, позволили выяснить возможности его применения для нового типа спектроскопии — активной спектроскопии, а также для генерации когерентного излучения. В результате исследований особенностей и характеристик основных типов параметрических генераторов, проведенные в МГУ, НИРФИ, КГУ, были определены оптимальные пути создания перестраиваемых по частоте параметрических генераторов света.

На основе проведенных исследований нелинейных процессов в оптике в высших учебных заведениях решается ряд прикладных задач. В частности, в МГУ, КГУ, НИРФИ созданы эффективные генераторы гармоник и параметрические преобразователи инфракрасного излучения в видимую область спектра. В Московском и Вильнюсском университетах для спектроскопии эффективно используются параметрические генераторы света. На основе исследований взаимодействия лазерного излучения с электро- и магнитоупорядоченными кристаллами, а также с ультразвуковыми и гиперзвуковыми волнами в КГУ и МГУ созданы эффективные модуляторы света и системы обработки и отображения информации.

Электродинамика. Исследования в области электродинамики традиционно занимают заметное место в научной деятельности ученых вузов. Работы, выполненные в ЛГУ в 1940—50 годах В. А. Фоком, одним из крупнейших советских физиков-теоретиков, сыграли важную роль в отечественной и мировой науке, определив основные идеи асимптотических методов в теории дифракции и распространения радиоволн. Можно отметить пионерские исследования по волноводам, выполненные в довоенные годы в МГПИ Е. М. Студенковым, погибшим на фронте в годы Великой Отечественной войны.

Работы В. А. Фока по теории дифракции получили дальнейшее развитие на кафедре математической физики ЛГУ. Выполненные там исследования во многом определяют современное состояние асимптотических методов в решении дифракционных задач.

Важное место в разработке вопросов теории дифракции и распространения электромагнитных волн занимают выполненные в МФТИ работы по теории возбуждения волноводов и резонаторов, теории открытых резонаторов и волноводов, методу факторизации и др., а также работы по теории неоднородных линий.

В ГГУ и НИРФИ были выполнены фундаментальные теоретические исследования поверхностных электромагнитных волн и их приложений, выяснены возможности широкого использования в электродинамике импедансных граничных условий, предложен принципиально новый частотный способ механического управления диаграммами направленности. В МЭИ разрабатывались методы синтеза импедансных антенн по заданным характеристикам излучения, методы решения сложных дифракционных задач, методы расчета антенных решеток.

Фундаментальные результаты в области разработки новых математических методов решения задач дифракции и распространения радиоволн получены в ХГУ. Существенный вклад в разработку вариационных методов решения внутренних задач электродинамики внесен исследованиями, выполненными в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА). Большое место в электродинамических исследованиях занимали работы в области линейной и нелинейной квазиоптики (НИРФИ и ЛГУ).

В ЛГУ и в НИРФИ изучены многие случаи распространения и дифракции электромагнитных волн в неоднородных средах, в том числе в неоднородной плазме.

В области теории дифракции следует отметить работы, выполненные в СФТИ, по дифракции волн в клиновидных областях, обобщение метода факторизации на решение трехмерных задач дифракции волн в импедансных системах, а также важный цикл работ по дифракции на нестационарных объектах (ЛГУ).

Большое внимание в исследованиях Воронежского, Ростовского, Днепропетровского университетов и других вузов уделялось машинным

методам анализа, синтеза и проектирования СВЧ-систем, что позволило создать ряд новых элементов и узлов многофункциональной СВЧ-аппаратуры. Созданы новые конструкции коммутаторов и фазовращателей на основе использования ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (Днепропетровский университет).

Можно отметить работы по теории замедляющих систем, анализу и синтезу СВЧ полосковых и микрополосковых элементов и узлов, расчету волноводов сложного поперечного профиля, выполненные в РГУ. Разработаны новые методы расчета решеток проводников, нашедшие применение при анализе спиральных и штыревых замедляющих систем электронных приборов, антенн вытекающих волн, волноводных фильтров и т. п., развит новый метод анализа неоднородных связанных линий, позволивший существенно ускорить расчет частотных характеристик таких линий на ЭВМ, разработан итерационный метод синтеза СВЧ-узлов по заданным характеристикам.

Выполнены большие исследования по методам измерения СВЧ-полей, в том числе квазиоптического типа, разработаны комплекты миниатюрных измерительных элементов, в частности, СВЧ-переход к интегральным схемам, разработана серия приборов на основе волноводно-диэлектрических резонаторов на повышенные уровни мощности (ХГУ). В СГУ был развит метод наведенных токов для моделирования различных полей. В Воронежском университете проводились исследования по визуализации электромагнитных полей СВЧ-диапазона: разработана электронная система для визуализации амплитудно-фазовых распределений СВЧ-полей, состоящая из матрицы управляемых полуволновых вибраторов, созданы экспериментальные образцы эффективных полупроводниковых радиооптических преобразователей.

Электроника*. В двадцатых годах центральной задачей электроники, решавшейся вначале в условиях полной научной блокады нашего государства, была разработка электронных ламп и создание их теории. Здесь прежде всего следует указать на работы С. А. Богуславского (МГУ) по теории электронных токов в вакууме, имевших основополагающее значение для теории электронных приборов. Уже в то время на повестке дня стояла задача разработки ламповых генераторов дециметровых и сантиметровых волн. На этой стадии развития электроники СВЧ исследования были сосредоточены на двух известных в то время СВЧ-генераторах: триоде в схеме тормозящего поля и магнетроне. Большой цикл исследований, посвященных физическим процессам в лампах с тормозящим полем и магнетронах, созданию на их основе пригодных для практического использования генераторов дециметровых и сантиметровых волн, был выполнен в МГУ, СГУ и ХГУ. Позднее (в тридцатые годы) сотрудники МГУ, ГГУ (ГИФТИ) и харьковские ученые оказали активную помощь промышленности в разработке магнетронов и других электровакуумных приборов, антенных устройств и приемно-передающих СВЧ-систем, предназначенных для экспериментов по радиообнаружению и связи.

Успешное применение радиолокации в годы войны стимулировало развитие известных и появились новые методы генерации и усиления СВЧ-колебаний. В 40—50 годы в МГУ, СГУ, ГГУ и других вузах выполнены фундаментальные теоретические и экспериментальные исследо-

* Здесь мы не будем касаться работ по электронной эмиссии и электрическому току в газах, большая часть которых посвящена вопросам, не относящимся непосредственно к радиофизике. Изложение результатов этих работ входит в задачи обзора по физической электронике.

вания ЛБВ и ЛОВ типа «О», клистронов, приборов типа «М». Эти работы успешно продолжаютя и в настоящее время.

Значительный интерес для понимания переходных процессов и режима стационарной генерации в магнетронных приборах представляют исследования, проведенные в ГГУ и ЛПИ. Ряд важных результатов по теории лучевых приборов магнетронного типа получены в СГУ.

Весьма значительным является вклад сотрудников Московского института электронного машиностроения (МИЭМ) и Саратовского политехнического института (СПИ) в построение нелинейной теории приборов типа «О». Следует также отметить исследования влияния полей пространственного заряда на работу приборов типа «О», выполненные в МИЭМ и Северо-Западном заочном политехническом институте (СЗПИ). Ряд эффективных методов, позволяющих исследовать характеристики различных электронных приборов СВЧ, был развит в СГУ.

В МГУ в последние годы проводились обширные исследования электронно-лучевых приборов параметрического типа, направленные на создание малошумящих СВЧ-усилителей.

Большой практический интерес представляют начавшиеся в конце 50-х годов в НИРФИ работы по созданию источников СВЧ-колебаний повышенной мощности на основе использования релятивистских эффектов в высоковольтных электронных пучках. Теоретические и экспериментальные исследования индуцированного циклотронного излучения релятивистских электронов привели к созданию нового класса СВЧ-генераторов и усилителей — мазеров на циклотронном резонансе (МЦР, гиротронов) — наиболее мощных приборов диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн. В последние годы теоретические и экспериментальные исследования индуцированного циклотронного (синхротронного) излучения электронов применительно к электронике СВЧ велись в МГУ, Киевском политехническом и Минском радиотехническом институтах.

С конца 60-х годов, после появления сильноточных электронных ускорителей, в НИРФИ начались широкие теоретические исследования различных физических механизмов, которые могут быть положены в основу действия мощных СВЧ-генераторов с ультрарелятивистскими электронными пучками. Некоторые варианты приборов, разработанных на базе этой теории, уже реализованы экспериментально (НИРФИ совместно с ФИАН). Успешные экспериментальные работы ведутся и в Томском политехническом институте.

Исследования в области полупроводниковой электроники в вузах в основном были направлены на разработку физических принципов действия полупроводниковых устройств, продвижение их в новые частотные диапазоны и на исследование свойств полупроводниковых материалов.

В проблемной радиофизической лаборатории МГПИ разработана методика субмиллиметровой спектроскопии высокого разрешения и проведены обширные исследования примесных уровней в полупроводниках. Там же созданы параметрические усилители СВЧ на полупроводниковых диодах.

В МГУ проведены исследования эффекта детектирования СВЧ-излучения на контакте Джозефсона и развита теория доменной неустойчивости в полупроводниках. Изучены шумы в полупроводниковых диодах, параметрических усилителях и умножителях частоты СВЧ-диапазона, а также шумы в ферритах и тонких магнитных пленках.

В НИРФИ была предсказана и рассчитана отрицательная высокочастотная проводимость, обусловленная пролетными эффектами в фазовом пространстве; обнаружены и исследованы эффекты преобра-

зования частоты излучения миллиметровых и субмиллиметровых волн в полупроводниках. Разработаны смесители на диодах с барьером Шоттки и на их основе созданы высокочувствительные приемники излучения миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов.

В КГУ в результате исследований контакта металл—полупроводник создана его физическая модель, разработаны методы теоретического описания таких контактов и работы детекторных, смесительных, умножительных и варакторных СВЧ-диодов, основанные на их использовании. Создана и внедрена технология указанных устройств. Построены теория усиления параллельных акустических волн в полупроводниковых пластинках дрейфом носителей и теории акустоэлектрического генератора с учетом волны пространственного заряда.

В МИФИ, начиная с конца 60-х годов, исследовались процессы переноса и релаксации зарядов, а также инжекционные токи в высокоомных полупроводниках и был обнаружен ряд новых явлений.

В МФТИ успешно развивается теория акустоэлектрических эффектов; открыты акустомагнитоэлектрический эффект, волны Гуляева. Эти работы привели к созданию серии акустоэлектрических устройств.

В ХГУ разработаны генераторы Ганна СВЧ-диапазона. Кинетическая теория поверхностных плазменных волн в полупроводниках разработана в ХГУ и ГИФТИ. В ГИФТИ построена теория неустойчивости пространственно-разделенных пучков плазмы твердого тела, исследованы электромагнитные свойства тонких пленок, периодических полупроводниковых структур и обнаружен квантовый размерный эффект в тонких полупроводниковых пленках.

В Вильнюсском университете развита теория горячих электронов в полупроводниках. Технология выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений с шириной запрещенной зоны, плавно меняющейся в зависимости от состава, использованных в микроэлектронике, разработана в Днепропетровском университете.

Подводя итоги работ вузовских радиофизиков, нельзя не сказать об их участии в создании научной и учебной литературы. Учеными вузов написано большое число монографий и учебных пособий по радиофизике и электронике, из которых многие переведены и изданы за рубежом.

В настоящее время преподавание радиофизических дисциплин в достаточной степени обеспечено учебными пособиями. Учебная литература по радиофизике и электронике постоянно пополняется новыми книгами, а содержание ранее изданных книг систематически обновляется при переизданиях.
