

Об исследованиях в области теоретической физики в ИФП НАН Украины: даты, люди, тематика, результаты.

Вместо введения.

Пятидесятилетие Института физики полупроводников НАНУ – достойный повод вспомнить о том, как развивались исследования по теоретической физике в институте. Повод вспомнить о тех, кто был и есть вовлеченными в эти работы и, в особенности, о тех, кто стоял у истоков, кто сформировал научную школу по теоретической физике в ИФП, определил принципы и основные направления развития работ по теории в институте. Повод напомнить о научных результатах, получивших оценки самого объективного судьи - времени.

Автор этих заметок не научный историк, не научный биограф, а просто исследователь, относящий себя к упомянутой научной школе по теоретической физике и причастный к исследованиям, проводимым в ИФП на протяжении последних сорока пяти лет. Участие автора в большинстве «теор. отдельных» событий позволяет ему надеяться на то, что выбор материала для этих заметок, суждения и обобщения обладают достаточной долей объективности и достоверности.

Общие сведения.

При организации Института физики полупроводников НАНУ и с самого начала его работы исследованиям по теории уделялось особое внимание. Было открыто два теоретических отдела (из 12 подразделений вновь образованного института):

- отдел теоретической физики, заведующий отделом — академик Соломон Исаакович Пекар;
- отдел теории полупроводниковых приборов, заведующий отделом — профессор Эммануил Иосифович Рашба.

Отделы получили номера - № 1 и № 2, соответственно. Уже само название отдела №1 указывало на фронт работ более широкий, чем теория твердого тела и теория полупроводников, в тоже время отдел №2 нацеливался на теоретическую поддержку как экспериментов

по физике полупроводников, так и на разработку идейной базы новых полупроводниковых приборов. Два теоретических отдела составляли теоретический сектор ИФП с общим теоретическим семинаром. Неформальным руководителем сектора и семинара был академик Пекар С. И.

Теоретические отделы возникли не на пустом месте - основу отделов составили сотрудники, перешедшие из Института физики НАНУ. Помимо упомянутых С. И. Пекара и Э. И. Рашбы, с момента образования отделов в них работали опытные профессора: Толпыго К. Б. (в последствии — чл.-корр. АН УССР) и Дыкман И. М., а также молодые (в то время) исследователи Бойко И. И., Буймистров В. М., Грибников З. С., Демиденко А. А., Писковой В. Н., Цеквава Б. Е., Шека В. И., Кучер Т. Й., Григорьев Н.Н., Толпыго Е. И. и др. В 1965-68 гг. в отдел пришли в качестве сотрудников или аспирантов выпускники университетов – Мельников В. И., Пипа В. Й., Акопян А. А., Кочелап В. А., Кукибный Ю. А., Соколов В. Н., Васько Ф. Т., Митин В. В. и др.

Следует отметить, что теоретическими исследованиями в институте занимались не только в теор. секторе. Ряд теоретиков, по разным причинам не попавших в списочный состав теор. отделов, сохраняя с ними самый тесный контакт, работали в экспериментальных лабораториях института. Среди них, прежде всего, М. Ф. Дейген, Саченко А. В., Яремко А. М., Прима Н. А., Хазан Л., Захленюк Н. А., Булашенко О. М. и др.

В 60-70-ые годы основную тематику отделов составляли:

- оптика кристаллов (Пекар С. И., Рашба Э. И., Писковой В. Н., Демиденко А. А., Цеквава Б. Е., Пипа В. Й.);
- динамика решетки (Толпыго К. Б., Кучер Т. Й.);
- электрон-фононное взаимодействие (Пекар С. И., Рашба Э. И., Писковой В. Н., Пипа В. Й., Кочелап В. А., Соколов В. Н.);
- зонная структура и спиновые явления (Рашба Э. И., Шека В. И., Бойко И. И.);
- явления переноса в полупроводниках, в том числе, размерные эффекты, сильнополевые и сильноточные явления (Рашба Э. Й., Дыкман И. М., Бойко И. И., Грибников З. С., Мельников В. И., Григорьев Н. Н., Васько Ф. Т., Кочелап В. А., Митин В. В., Соколов В. Н.);
- акустоэлектроника (Пекар С. И., Писковой В. Н., Демиденко А. А., Цеквава Б. Е., Кукибный);

- теория полупроводниковых приборов (Рашба Э. И., Толпыго К. Б., Грибников З. С.);
- нелинейные эффекты в лазерных полях, теория химических лазеров (Пекар С. И., Акопян А. А., Кочелап В. А., Кукибный Ю. А., Измайлов И. А., Наумов В. В. и др.)

В 1966 г. в Москве-Черноголовке организовался Институт теоретической физики АН СССР (в последствии — ИТФ им. Л. Д. Ландау). Ряд сотрудников теор. отделов получили приглашение работать в Москве. Приглашение принял Э. И. Рашба, возглавивший там сектор по теории полупроводников и В. И. Мельников. После отъезда Э. И. Рашбы заведовать отделом полупроводниковых приборов стал профессор Дыкман И. М. (1967). Важно, что в дальнейшем ни Э. И. Рашба, ни В. И. Мельников не теряли связь с ИФП, продолжались совместные работы, на семинарах теор. сектора систематически докладывались и обсуждались результаты, полученные в ИТФ АН СССР.

В последующие годы теор. сектор медленно, но верно «прирастал» за счет исследователей, успешно прошедших аспирантуру. Так в теор. секторе в 70-х годах появились Дыкман И. М., Пекар В. С., Иващенко В. М., Измайлов И. А., Рубо Ю. Г., Борблик В. Л., Наумов, В. В., Балев О. Г. и др.

В 80-х годах теоретические отделы пополнились большой группой талантливой молодежи. Пришли в отдел Райчев О. Э., Сиренко Ю. Н., Стриха М. В., Мельников Л. Ю., Бармашенко Б. Д., Кузнецов А. В., Мельникова Ю., Вагидов Н., Смелянский В. Н. и др.

В 1983 г. теоретический отдел №2 был преобразован в лабораторию по теории полупроводниковых приборов. Заведовать лабораторией стал профессор Грибников З. С. Формально лаборатория вошла в состав отдела №1. Фактический же статус отдела, с независимостью в планировании и проведении исследований, подборе сотрудников и пр., сохранялся.

В общих терминах основная тематика отделов оставалась неизменной. Однако, внимание было перенесено на квантовые явления, в частности, разрабатывалась теория квантования световых полей в диспергирующих средах, поглощающих средах, в микрорезонаторах. Анализировались

сверхвысокочастотные эффекты, сверхбыстрый электронный транспорт, электронные флуктуации. В фокусе исследований были новые полупроводниковые материалы, в частности, узкозонные полупроводники и структуры субмикронных масштабов. Были начаты работы по тепловому излучению. Существенно вырос удельный вес работ, выполняемых с использованием электронно-вычислительных машин.

В 1985 г. умер руководитель отдела теоретической физики и основатель научной школы по теории, академик Соломон Исаакович Пекар. Соратники и ученики С. И. Пекара, в том числе, Толпыго К. Б., Рашба Э. Й., Кривоглаз М. А. обратились в дирекцию и ученый совет ИФП с предложением назначить руководителем отдела автора этих заметок. Предложение было поддержано. К тому времени численность теоретического сектора (с учетом аспирантов) достигала 30 человек. В дальнейшем работа теоретического сектора продолжалась с ориентацией на научные традиции и правила школы С. И. Пекара.

С конца 80-х, отражая тенденции развития полупроводниковой науки, в тематике отдела стали доминировать исследования полупроводниковых гетероструктур, низкоразмерных электронных систем и приборов на их основе.

Впервые появилась возможность участвовать в международных конференциях и наладить международное сотрудничество. В результате были установлены плодотворные научные контакты со многими странами, в том числе, с США, Великобританией, Германией, Италией, Канадой и др. В условиях чрезвычайно быстрого развития технологий полупроводниковых материалов и структур, методик исследований, такие контакты оказались чрезвычайно важными, поскольку они выводили сотрудников и коллектив отдела на самые актуальные проблемы в нашей науке. Некоторые из научных связей, установленных в те годы, оказались настолько прочными, что сохраняются до сих пор (более 20 лет!), несмотря на трансформацию конкретных тематик. Упомяну некоторые из направлений международного сотрудничества.

Для молодых начинающих исследователей очень важна кооперация с Центром Теоретической Физики им. проф. Салама в Триесте (Италия). С 1988 г. и по сегодняшний день существует договор между Центром и теор.

отделом, согласно которому молодые исследователи имеют возможность посещать Центр, работать там и участвовать в многочисленных конференциях, проводимых в Центре. Надо отметить, что проблемы конденсированных материалов (твердых тел, полупроводников и пр.) занимают в исследованиях Центра одно из главных мест. За эти годы все без исключения молодые исследователи отдела многократно посещали Триест, привозя отсюда знания и информацию о самых современных научных направлениях в области теории и физики твердого тела. Не менее важно, что для многих Триест стал местом, где они познакомились с жизнью за рубежом, устройством западного общества, организацией науки, установили персональные контакты и пр.

Не менее важной стала кооперация с университетами США, специализирующимися в области теории полупроводниковых приборов и ведущими общие исследовательские программы – Wayne State University, Detroit, University of Illinois at Urbana/Champaign, North Carolina State University, Raleigh, State University of New York at Buffalo, NY. Достаточно перечислить сотрудников отдела, многократно посещавших эти университеты: Митин В. В., Кочелап В. А., Грибников З. С., Васько Ф. Т., Шека В. И., Пипа В. И., Сиренко Ю. Н., Вагидов Н., Райчев О. Э., Соколов В. Н. Результатом сотрудничества стали не только многочисленные совместные публикации, но и обобщающие обзоры и монографии (см. ниже). Это сотрудничество реализовалось также в рамках международных проектов таких международных организаций как CRDF, NATO for Peace, UNTC и др.

Последовательная работа с молодыми исследователями, участие их в исследованиях самых современных проблем, привлечение к международной кооперации способствовали тому, что к началу 90-х в отделе образовалась очень сильная и активная группа молодых теоретиков: Рубо Ю. Г., Стриха М. В., Сиренко Ю. Н., Кузнецов А. Н., Захленюк Н. А., Булашенко О. М., Смелянский В.Н. и др. К сожалению, социально-экономическое состояние страны в то время было настолько сложным, что большинство из названных молодых и энергичных людей не могли, фактически, содержать свои семьи и были вынуждены переехать в зарубежные исследовательские организации. Оглядываясь назад, могу с горечью утверждать, что «исход» научной молодежи в 90-х годах был достаточно общей тенденцией и является невосполнимой потерей как для украинской науки, так и для страны в целом.

Однако, жизнь в стране, институте и отделе продолжалась, пришли новые аспиранты. В 90-х годах в отдел были приняты и защитили кандидатские диссертации Главин Б. А. и Линник Т. Л. С 2000 г. несколько улучшилась «демография» отдела, появились новые аспиранты. В целом их подготовка существенно уступает той, с которой приходили выпускники вузов в 80-е годы и ранее. Однако, те из них, кто проявляет упорство, быстро ликвидируют недостаток знаний и в дальнейшем успешно работают. Так в отдел был принят и быстро защитил кандидатскую диссертацию Коротеев В. В.

С конца 90-х годов в отдельской тематике центральное место стали занимать исследования сверхбыстрых явлений и проблем взаимодействия полупроводников с терагерцовым излучением, новые широкозонные материалы на основе нитридов группы III, исследования наноструктур и наносистем, включая наноразмерные квантовые точки, одномерные «провода». Используя почти 50-летний опыт работ по спин-орбитальному взаимодействию, значительное внимание уделяется задачам спинтроники. В самое последнее время стали изучать материалы в один атомарный слой - графены и т. п.

Изложив общие, скорее формальные, сведения о теоретическом секторе ИФП, вспомним о тех, кто стоял у истоков, кто сформировал научную школу по теоретической физике, определил принципы и основные направления работ по теории в институте: это прежде всего академик С. И. Пекар, его ближайшие ученики и соратники — профессора К. Б. Толпыго и Э. И. Рашба.

Пекар Соломон Исаакович.

Академик АН УССР С. И. Пекар принадлежит к плеяде выдающихся физиков-теоретиков, труды которых составляют фундамент современной теории твердого тела. Отличаясь большой глубиной и ясностью, работы С. И. Пекара являются основополагающими в целом ряде направлений. С его именем связано несколько важнейших открытий в физике твердого тела. Теория выпрямителей и автолокализованных состояний электронов, названных им поляронами, волны Пекара, «пекариан», предсказание бесфононной линии вошли в физику как классические результаты и сегодня остаются источником новых идей и достижений.



Основатель и первый руководитель отдела теоретической физики ИФП НАНУ, академик Пекар Соломон Исаакович.

Соломон Исаакович Пекар родился 16 марта 1917 г. в г. Киеве. Его отец был юристом, мать — учительницей. В 1933 г. он поступил на физический факультет Киевского университета. В эти годы специализация в области теоретической физики в Киевском университете отсутствовала, но лекции по теоретической физике читались; среди лекторов были видные теоретики Г. Бек и Н. Розен. Студенты, которые стремились специализироваться в области теоретической физики, обучались на кафедре электрофизики, возглавляемой Н. Д. Моргулисом, а практику проходили в теоретическом отделе Ленинградского физико-технического института АН СССР. Этим отделом руководил Я. И. Френкель, и здесь у Соломона Исааковича завязались первые научные контакты с физиками-теоретиками. Стремление к самостоятельной научной работе проявилось у С. И. Пекара еще в студенческие годы. В то время он выполнил работу по нахождению функции распределения электронов в плазме газового разряда при наличии неупругих потерь [С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 9, с. 1015 (1939)]. Она была доложена на сессии Отделения физики АН СССР в 1938 г. и вызвала горячие споры и дискуссии, победителем в которых оказался молодой студент.

С 1938 г., окончив университет, С. И. Пекар приступает к работе в Институте физики АН УССР, разрабатывая теорию выпрямления на контакте металл — полупроводник. Одновременно он занимается в аспирантуре под руководством И. Е. Тамма. Выбор темы в значительной мере опреде-

еялся направлением экспериментальных работ в этом институте. Теория выпрямления тогда находилась в центре внимания многих выдающихся физиков в Советском Союзе и за рубежом. С. И. Пекару в работах 1939—1941 гг. удалось развить наиболее общую теорию выпрямления в монополярной системе [С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 9 с. 534 (1939), т. 10, с.1210 (1940); т. 11, с.282 (1941)]. Существенное продвижение было достигнуто в области теории сильных токов через контакты: получено точное решение задачи и предсказан неожиданный эффект — переход в запиорном слое от режима обеднения к режиму обогащения по мере возрастания обратного смещения на контакте. Почти сразу же этот эффект был подтвержден экспериментально. Работа С. И. Пекара получила высокую оценку. После ее обсуждения на своем семинаре Л. Д. Ландау сказал: «В Киеве произошло самозарождение теоретической физики». На защите диссертации [С. И. Пекар, «Исследования по теории полупроводников», Киев. гос. ун-т., Киев, 1941] в мае 1941 г. 24-летнему С. И. Пекару по предложению В. Е. Лашкарева, И. Е. Тамма и Я. И. Френкеля была сразу присуждена степень доктора физико-математических наук.

¹ Т. 16. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Вып. 4
1946

ЛОКАЛЬНЫЕ КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ИДЕАЛЬНОМ ИОННОМ КРИСТАЛЛЕ

С. Пекар

Рассматриваются локальные состояния электрона в идеальном кристалле, образованном с помощью периодического расположения атомов. Показано, что в результате периодического расположения атомов электроны образуют локализованные состояния, которые стабилизируются взаимодействием с решеткой. Электроны, в свою очередь, стабилизируются взаимодействием с решеткой. Локализация устойчивости таких локализованных состояний, вычислена для основных параметров, включая температурную зависимость и зависимость от частоты.

Дискретные электронные состояния в периодическом поле идеального кристалла рассмотрены в основе квантовой механики в обширных работах Блоха [1], Паули [2], Бриллюэна [3] и других авторов. По сути точного решения задачи известны большие энергетические группы, однако общий характер решения изучен хорошо: энергетический спектр электрона представляет собой чередование разрешенных и запрещенных зон энергии, а ψ -функция электрона представляет собой сложную волну, амплитуда которой модулирована с периодом кристаллической решетки.

Нарушение периодичности потенциала в кристалле (химические примеси, дефекты, дислокации и другие нарушения периодичности кристалла) могут привести к появлению в кристалле локальных состояний электрона, т. е. таких состояний, в которых ψ -функция электрона отлична от нуля лишь в небольшой области пространства вблизи места нарушения периодичности.

Критерий случаев, когда локальные состояния могут возникнуть, дан Паули [2] и Ландау [4]. Как показал И. К. Тамм [5], локальные состояния электрона могут возникнуть у поверхности кристалла, где образуется идеальный периодический ход потенциала.

Л. Д. Ландау [4], помимо этого, впервые указал на возможность возникновения локальных состояний электрона в идеальном кристалле в том случае, если состояние с локально деформированным кристаллом и связанным электроном окажется энергетически выгоднее состояния с идеальным кристаллом и свободным электроном. Д. И. Баландин [6] исследовал возможность возникновения локальных состояний электрона, связанных с деформацией кристалла, и получил качественный критерий общего характера.

В настоящей работе будут рассмотрены, главным образом, идеальные кристаллы (без примесей, трещин и т. п.), в которых локальные состояния электрона возникают вследствие деформации кристалла силой локализованного электронного. Особенность настоящей работы заключается в том, что здесь впервые конкретизируются силы, деформирующие кристалл, и характер этой деформации. Именно, в рассматриваемых деформациях кристалла отклоняется с антисимметричной поляризацией кристалла нулевыми полями локализованного электрона. В этом случае задача становится полностью определенной и определяется путь к количественному рассмотрению локальных состояний электронов.

[1941]

Заглавная страница первой работы С. И. Пекара по теории поляронов.

Научные связи, зародившиеся в то время у С. И. Пекара с такими выдающимися теоретиками как Я. И. Френкель, И. Е. Тамм и Л. Д. Ландау, а затем и Н. Н. Боголюбов, укреплялись в последующие годы. Соломон Исаакович всегда стремился обсудить с ними интересующие его научные проблемы, а также полученные им новые результаты. Особенно тесные научные связи установились у него с Л. Д. Ландау, через семинары которого он старался «пробивать» свои основные работы. Сближению с Л. Д. Ландау во многом способствовала работа С. И. Пекара по теории поляронов.

В годы Великой Отечественной войны, в Уфе, где работали многие сотрудники Института физики АН УССР, С. И. Пекар концентрирует усилия на разработке полупроводниковых приборов, необходимых для фронта. Тогда же раскрылись и новые грани его таланта — он проявил себя как способный инженер и конструктор. Решенные им технологические проблемы позволили существенно интенсифицировать производство полупроводниковых выпрямителей.

В 1944 г., после возвращения в Киев, С. И. Пекар увлекается задачей о сильном взаимодействии электрона с кристаллической решеткой. К тому времени в этой области существовала единственная работа Л. Д. Ландау [L. D. Landau, *Sov. Phys.*, v. 3, p. 664 (1933)], в которой была высказана идея о возможности «захвата» электрона решеткой. Соломон Исаакович нашел удивительно изящную модель сильной связи электрона с решеткой — электрон, взаимодействующий с макроскопическим полем поляризованной решетки ионного кристалла, — и построил в рамках этой модели полную теорию нового типа квазичастиц, которые он назвал поляронами [С. И. Пекар, *ЖЭТФ*, т. 16, с. 335, (1946); т. 16, с. 341 (1946)]: полярон — это «одетый» полем поляризованной решетки электрон, который движется по решетке, сопровождаемый поляризационной «шубой». Масса такой квазичастицы значительно превышает массу «голого» электрона, и ее тепловое движение является медленным. Поэтому Пекар назвал эти частицы автолокализованными. Он показал, что зонные состояния неустойчивы, образование поляронов не требует преодоления потенциального барьера и они являются основными носителями тока. Полярон оказался той «жемчужиной», вокруг которой С. И. Пекаром и его учениками в последующие годы была создана теория обширного класса явлений, связанных с электрон-решеточным взаимодействием: различные типы автолокализации, влияние решетки на электронные состо-

яния примесных центров и т. д. Оценивая эти работы, Я. И. Френкель писал в 1948 г.: «... поражает фундаментальность трактовки и точность полученных результатов. Эти работы войдут в историю физики как классические. Они, несомненно, являются наиболее значительными из работ, опубликованных советскими физиками-теоретиками за последние годы».

При оценке значения, которое имело создание теории поляронов, нужно различать два разных аспекта ее влияния на развитие современной физики.

Первый из них — общетеоретический. Теория поляронов была сформулирована С. И. Пекаром как континуальная теория, что сделало ее идеальной моделью для теории поля. Первую работу по теории поляронов С. И. Пекар опубликовал в 1946 г., т. е. за несколько лет до появления статей Ю. Швингера и Р. Фейнмана, давших мощный импульс развитию квантовой электродинамики. Эта работа Пекара оказалась весьма своевременной, и значение теории поляронов как простейшей модели теории поля было всеми теоретиками вскоре осознано. Сам Соломон Исаакович сосредоточил свои усилия на случае сильной связи, который описывается в адиабатическом приближении. Тогда в теоретической физике адекватный аппарат для описания такой ситуации отсутствовал, и С. И. Пекар его создал. Уравнение Пекара для основного состояния полярона и формула Ландау — Пекара для эффективной массы полярона занимают в этой теории центральное место. Разработанный С. И. Пекаром аппарат стал первым примером популярных сейчас классических решений уравнений нелинейной теории поля, а изученный им адиабатический предел соответствует непертурбативной теории, не формулируемой на языке диаграммной техники. Н. Н. Боголюбов, который работал в то время в Киеве, первым оценил роль полярона в теории поля, назвав его алмазом, который математической шлифовкой должен быть превращен в бриллиант и создал совместно с С. В. Тябликовым оригинальный подход к адиабатической теории частицы, связанной с квантованным полем. Развитый ими формализм является адекватной основой для получения высших приближений в теории поляронов, в частности, для построения теории их подвижности [N. N. Bogoliubov, *Ukr. Mat. Zh.* v. 2, p. 3 (1950); S. V. Tyablikov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* v. 21, p. 377 (1951)]. Уместно отметить, что спустя много лет представитель научной школы С. И. Пекара Мельников В. И. показал, что после «одевания фононной шубы» эффективный гамильтониан полярона и фононной подсистемы является квадратичным по фононным амплитудам. Это

позволило определить перенормировку фононного спектра и найти, что за основной механизм рассеяния адиабатического полярона отвечают двухфононные процессы [G. E. Volovik, V. I. Mel'nikov and V. M. Edel'stein, JETP Lett. v. 18, p. 81 (1973)].

В 50-е годы Н. Фрелих переформулировал теорию поляронов в рамках стандартного формализма теории поля и развил теорию слабой связи [H. Frohlich, H. Pelzer, and S. Zienau, Phil. Mag. , v. 41, p. 221 (1950)]. Т. Д. Ли, Ф. Е. Лоу и Д. Пайнс предложили первый вариант теории поляронов с промежуточной связью [T. D. Lee, F. E. Low, and D. Pines, Phys. Rev., v. 90, p. 297 (1953)], а Р. Фейнман применительно к теории поляронов создал свой вариационный метод, получивший впоследствии широкую известность [R. P. Feynman, Phys. Rev., v. 97, p. 660 (1955)]. Благодаря всем этим работам, теория поляронов явилась одним из основных каналов, через которые мощные методы теории поля начали проникать в теорию твердого тела, обогащая ее аппарат. Тем временем сам С. И. Пекар, отдавая дань увлечениям того времени, активно занялся применением методов теории поляронов в мезодинамике. Развитые им в теории поляронов идеи и методы оказались актуальными и в других областях физики — в теории электронных состояний в квазиодномерных и неупорядоченных системах, жидкостях, газах, плазме, магнетиках и т. д. Со временем они стали использоваться все чаще (с надлежащими ссылками или без них), а иногда их высказывали заново и переоткрывали.

Второй аспект значения развитых идей — это влияние теории поляронов на физику твердого тела. В 30-е годы роль сильного взаимодействия электрона с решеткой на качественном уровне была объяснена применительно к электронам, связанным в локальных центрах. Языком этой теории стал метод конфигурационных кривых Зейтца — фон Хиппеля — Вильямса. В известной монографии Н. Мотта и Р. Гёрни, суммировавшей основные достижения того времени, было показано, что подобная простейшая схема способна объяснить происхождение значительной ширины полос поглощения и люминесценции, стокового сдвига, различия термической и оптической энергий активации и т. д. Но количественной теории не существовало и оставалось неясным, к каким изменениям в выводах приведет учет практически бесконечного числа степеней свободы решетки. Однако главный вопрос состоял в выяснении природы носителей тока. До работ С. И. Пекара взаимодействие с решеткой рассматривалось либо как причина рассеяния, причем

считалось, что в промежутках между актами рассеяния электрон движется как свободный, либо как фактор, приводящий к «захвату» электрона решеткой, в результате которого частица полностью локализуется. Решающий шаг был сделан в работах С. И. Пекара 1947—1948 гг., в которых рассматривалась возможность поступательного движения автолокализованного электрона — носителя тока и, особенно, в работе Л. Д. Ландау и С. И. Пекара 1948 г. [Л. Д. Ландау, С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 18, с. 419 (1948)], в которой была вычислена эффективная масса полярона. Значение последней работы трудно переоценить. Можно только удивляться поразительному совпадению: перенормировка массы в теории сильной связи была осуществлена в том же году, когда была создана инвариантная теория перенормировок в квантовой электродинамике — теория слабой связи.

Работы С. И. Пекара по поляронам, выполненные в 40-х годах, были суммированы в его монографии [«Исследования по электронной теории кристаллов», Москва, Гостехтеоретиздат, 252 с., (1951)]. Монография была переведена на немецкий [«Untersuchungen über die Elektronentheorie Kristalle», Berlin, Akad/Verlag, (1954)] и английский [«Research in electron theory of crystals», USA, Department of Commerce, Washington (1963)] языки.

Успех теории поляронов сильной связи повлек за собой все расширяющийся поток исследований во всем мире. Мы остановимся только на некоторых работах, выполненных в последующие годы С. И. Пекаром и его сотрудниками. В рамках адиабатической связи совместно с И. М. Дыкманом была построена теория автолокализации экситонов Ванье—Мотта. В 1951 г. была развита (совместно с М. Ф. Дейгеном) теория автолокализации электронов в неполярных кристаллах и показано, что автолокализация происходит лишь в том случае, если константа связи превышает некоторое пороговое значение, причем радиус автолокализованных состояний всегда порядка постоянной решетки. Такое автолокализованное состояние было названо конденсоном [М. Ф. Дейген, С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 21, с. 271 (1951)]. При выполнении этой работы, практически одновременно с Дж. Бардином и У. Шокли, был сформулирован метод деформационного потенциала. Значительное место в последующих исследованиях заняла теория поляронов при промежуточной связи с фононами. Осуществление работ в этом направлении диктовалось как внутренней логикой развития теории, так и экспериментом. Ирония судьбы состоит в том, что теория поляронов появилась в известном смысле

слишком рано — за десять лет до того, как был открыт циклотронный резонанс, позволивший измерять эффективные массы носителей. При учете реальных значений эффективных масс были получены значения констант связи, которые не укладывались в рамки критериев предельно сильной связи. Поэтому актуальным оказалось создание в 1957 г. С. И. Пекаром (совместно с В. М. Буймистровым и М. А. Кривоглазом) эффективных методов промежуточной связи.

К работам по теории поляронов тесно примыкают работы С. И. Пекара 1949—1953 гг. по теории примесных центров, взаимодействующих с решеткой. Результатом этих работ явилась общая теория формы спектров поглощения и люминесценции таких центров. Построенная Пекаром характерная кривая, описывающая форму спектров примесных центров, взаимодействующих с бездисперсионными оптическими фононами, получила в мировой литературе название «пекариан». При исследовании взаимодействия с фононами, обладающими произвольной дисперсией частот колебаний, в 1953 г. (совместно с М. А. Кривоглазом) удалось, в частности, предсказать существование в примесных спектрах чрезвычайно узкой бесфононной линии [М. А. Кривоглаз, С. И. Пекар. Тр. Ин-та Физики АН УССР, в. 4, с. 37-70 (1953)]. Аналогичная линия в рентгеновских спектрах внутриядерных переходов была экспериментально открыта и теоретически объяснена Р. Мёссбауэром в 1958 г. и сразу приобрела большое значение. Роль бесфононных линий в оптических спектрах определилась в последнее десятилетие, после развития методов селективной спектроскопии высокого разрешения, позволивших исключить большое неоднородное уширение.

К проблеме сильной электрон-фононной связи С. И. Пекар многократно возвращался на протяжении всей жизни, в последний раз в 1979 г., когда им была построена (совместно с соавторами) теория автолокализованного барьера для экситона Ванье—Мотта. Следует отметить, что Л. Д. Ландау в цитированной выше публикации 1933 г. предполагал, что для образования экситона, «захваченного» решеткой, необходимо преодоление потенциального барьера. С. И. Пекар в своих работах доказал, что для полярона большого радиуса (взаимодействие с длинноволновыми фононами) такой барьер отсутствует. Однако для нейтрального экситона Ванье-Мотта в полярной среде, где определяющим, очевидно, является взаимодействие с более коротковолновыми фононами, потенциальный барьер возникает [С. И. Пекар, Э.

И. Рашба, В. И. Шека, ЖЭТФ, т. 76, с. 251 (1979)].

Все перечисленное выше составляет лишь часть тех направлений исследований, которые были стимулированы появлением пекаровской теории поляронов сильной связи. Современная теория твердого тела немыслима без теории поляронов. А ядром в ней, по-прежнему, остаются работы С. И. Пекара 1946—1948 гг., поражающие своим эстетическим совершенством.

Т. 33. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Вып. 4(10)
1957

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КРИСТАЛЛЕ,
В КОТОРОМ ВОЗНИКАЮТ ЭКСИТОНЫ

С. И. Пекар

Рассматриваются световые волны, частоты которых попадают в область экситонного поглощения света в кристалле или близки к ней. Получена связь между удельным дипольным моментом поляризации кристалла и напряженностью электрического поля; эта связь не является прямой пропорцией, как обычно предполагалось, а выражается дифференциальным уравнением. Поэтому, система уравнений Максвелла получается более высокого порядка и обладает более сложными решениями, чем общезвестные решения, следующие из простейшей феноменологической теории. Показано, что в кристалле существует несколько волн той же частоты, поляризации и направления, но с разными показателями преломления. Это явление отличается от двойного лучепреломления и имеет место даже в изотропно поляризуемых (кубических) кристаллах. Показано существование строго продольных электрических волн в кристалле. Рассмотрены поверхностные экситонные состояния — аналоги поверхностных электронных состояний.

1. Связь удельного дипольного момента поляризации с электрическим полем

Пусть Ψ^0 обозначает основное состояние кристалла, Ψ_k — возбужденные экситонные состояния с квазимпульсом k , а Ψ_n — прочие возбужденные состояния кристалла. Здесь экситонным состоянием называется любое возбужденное состояние кристалла, среди квантовых чисел которого имеется только одно непрерывное (трехмерное) квантовое число k . Такое общее определение экситона охватывает, например, экситон Френкеля [1], экситон Ванье — Мотта [2, 3], просто фонон, волну электронно-колебательного возбуждения молекулы, распространяющуюся по кристаллу.

Пусть, далее, H есть оператор энергии кристалла, а W — оператор энергии его взаимодействия с внешним электрическим полем. Вышеупомянутые волновые функции и операторы зависят как от координат электронов, так и от координат ядер атомов кристалла.

Для рассмотрения кристалла, возмущенного малым переменным электрическим полем, положим

$$\Psi = \Psi^0 + \phi + \psi', \quad \phi = \sum_k c_k \Psi_k, \quad \psi' = \sum_n c_n \Psi_n. \quad (1)$$

причем всю зависимость от времени будем считать включенной в коэффициенты c_k и c_n , так что Ψ_k и Ψ_n от времени не зависят. W , ϕ и ψ' будем считать величинами первого порядка малости. Тогда, сохранив во временном уравнении Шредингера только члены первого порядка малости, получим

$$\left[i\hbar \frac{\partial}{\partial t} - H \right] c_k \Psi_k = W_{k0} \Psi_k, \quad W_{k0} \equiv \int \Psi_k^* W \Psi^0 d\Omega. \quad (2)$$

Интеграл берется по координатам всех частиц, образующих кристалл.

Совершенно аналогичные уравнения получаются для $c_n \Psi_n$.

Предположим, что электрическое поле достаточно плавно меняется в пространстве (мало изменяется на расстоянии порядка постоянной решетки). Тогда можно ввести средний удельный дипольный момент диэлектрической поляризации кристалла $P(r)$, обусловленный внешним электрическим полем:

$$P(r) = \int \Psi^* \Psi \hat{P}(r) d\Omega, \quad d\Omega = \prod_i dx_i dy_i dz_i. \quad (3)$$

Заглавная страница первой работы С. И. Пекара по теории добавочных световых волн.

Второй большой цикл работ С. И. Пекара связан с открытием добавочных волн в кристаллах. Он был начат статьей «Теория электромагнитных волн в кристалле, в котором возникают экситоны», опубликованной в 1957 г. [С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 33, с. 1022 (1957)]. Для того чтобы объяснить значе-

ние этой работы, начнем с замечания, носящего исторический характер. Невероятно, но факт, что на протяжении своей 25-летней истории теория электронных экситонов строилась исключительно как квантовомеханическая, в которой электродинамические эффекты не учитывались. И это несмотря на то, что в динамике ионных решеток, где поляризационные фононы могут в полной мере рассматриваться как «колебательные экситоны», электродинамические эффекты традиционно учитывались и в различной форме изучались в работах М. Борна и М. Гёпперт-Майер, К. Б. Толпыго, К. Хуанга. Светомеханические колебания — поляритоны, возникающие при учете электродинамических эффектов, вошли в учебники. Простой перенос электродинамического подхода на электронные экситоны являлся чисто технической проблемой — он не был связан с принципиальными трудностями. Однако С. И. Пекар уловил важное количественное различие между электронными и колебательными экситонами, которое приводит к интересному физическому явлению — возникновению новых ветвей в спектре электромагнитных волн, названных им «добавочными». Добавочные волны Пекара возникают вблизи экситонных резонансов, в знаменателе дисперсионной формулы которых частотные члены почти полностью сокращаются и поэтому приобретает значение член, связанный с кинетической энергией экситона и содержащий его импульс. В результате порядок дисперсионного уравнения электронного поляритона, т. е. гибрида «фотон-экситон», повышается и у него появляются новые корни — они-то и соответствуют добавочным волнам. Различие электронного и колебательного экситонов проявляется в том, что у электронных экситонов типичные значения эффективных масс на два порядка меньше, чем у колебательных (и, следовательно, кинетические энергии при том же импульсе на два порядка больше). Именно благодаря этой малости массы, длина волны для соответствующих добавочных волн попадает в макроскопическую область и поэтому данное явление может быть полностью описано в рамках макроскопической электродинамики.

Таким образом, в статье 1957 г. была, в сущности, построена кристаллооптика экситонов с учетом запаздывания и получен совершенно новый физический результат — предсказаны добавочные волны. При этом была четко указана область спектра, в которой их следовало искать. Результат являлся поразительным уже хотя бы потому, что линейная кристаллооптика представлялась завершенной дисциплиной, подтвержденной на протя-

жени столетия многочисленными экспериментами. Неожиданность полученного результата образно выразил профессор А. И. Ансельм, сказавший, что это все равно, что «найти белый гриб на Невском».

Из развитой теории вытекал ряд следствий, допускающих прямую экспериментальную проверку. Среди них, кроме самого факта существования добавочных волн, — возможность сильной дисперсии диэлектрической проницаемости в области, в которой практически отсутствует поглощение, прохождение света через кристалл в диапазоне частот, традиционно считавшемся областью полного отражения (аналог области «остаточных лучей» в кристаллооптике решетки) и др. Возник и ряд теоретических вопросов, связанных с тем, как «вписать» теорию добавочных волн в макроскопическую кристаллооптику. Эти вопросы вызвали оживленные дискуссии, способствовавшие в свою очередь привлечению внимания многих крупных физиков к возникшим проблемам. Однозначно решился вопрос о характере изменений, которые должны быть внесены в феноменологическую теорию, чтобы описать возникновение добавочных волн. Причина их появления, состоящая в зависимости энергии экситона от его квазиимпульса, на языке феноменологической теории трактуется как пространственная дисперсия диэлектрической проницаемости, т. е. как ее зависимость от волнового вектора фотона. Только в отличие от слабой пространственной дисперсии, которая существует в широком диапазоне частот и обуславливает в нецентрально-симметричных кристаллах естественную оптическую активность (т. е. приводит к поправкам к закону распространения обычных волн), пространственная дисперсия вблизи экситонных резонансов настолько сильна, что является причиной возникновения новых волн. Важно также, что для внесения ее в тензор диэлектрической проницаемости мало знать симметрию кристаллического класса кристалла, а следует опираться на симметрию конкретного экситонного перехода. Поэтому феноменологическое описание в этом случае неизбежно должно включать в себя данные, неразрывно связанные с микроскопической теорией. Значительно более сложным явился вопрос о дополнительных граничных условиях, который неизбежно возник в связи с тем, что учет пространственной дисперсии увеличивает порядок системы максвелловских уравнений. Граничные условия нельзя в общем случае выразить через объемные параметры материала — они могут существенно зависеть от свойств поверхностных слоев. По-видимому, требование обращения в нуль на границе кристалла экс-

итонного вклада в поляризацию, сформулированное С. И. Пекаром в его первой статье, и поныне остается наиболее разумным нулевым приближением. К числу важнейших работ этого цикла следует отнести и работу С. И. Пекара, в которой на макроскопическом уровне прослежена связь между поляритонами (названными им светозкситонами) и экситонами [С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 38, с. 1786 (1960)].

Уже в стенах ИФП С. И. Пекар много сил отдал разработке теории различных экспериментов, в которых должны проявиться добавочные волны, и непосредственно принял участие в постановке некоторых из них, детально анализируя экспериментальные данные. Последние эксперименты, выполненные с его участием, оказались весьма успешными. К настоящему времени добавочные волны обнаружены в различных кристаллах несколькими независимыми способами. По-видимому, наиболее эффективным оказался метод резонансного комбинационного рассеяния, который стал применяться после разработки перестраиваемых лазеров для соответствующего диапазона частот. В этих экспериментах наблюдение добавочных волн как соответствующих участков поляритонных ветвей превратилось в течение последнего десятилетия во вполне обыденный, почти рутинный процесс.

В 1986 г. пионерская работа С. И. Пекара 1957 г. о добавочных волнах в кристаллах была официально признана открытием (Диплом на открытие №323, «Явление распространения добавочных световых волн в кристаллах»).

Активные исследования С. И. Пекара по оптике кристаллов в области экситонного поглощения продолжались в 60-е и 70-е годы в ИФП НАНУ и были обобщены в монографии «Кристаллооптика и добавочные световые волны» («Наукова думка», 1982 г.). Английский перевод монографии был издан в 1983 г. [«Crystal optics and additional light waves» (Menlo Park, Calif., The Benjamin Cummings Publishing Company, 1983, 369 p.).

Одновременно большое внимание в этот период С. И. Пекар уделял развитию новых направлений исследований, основанных на высказанных им оригинальных идеях.

В 1965 г. Соломон Исаакович опубликовал работу, в которой выдвинул идею усиления или генерации ультразвука в непьезоэлектрическом

кристалле, основанную на электрострикционном взаимодействии деформации с внешним электрическим полем [С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 49, с. 621 (1965)]. В сильном электрическом поле возможны смешанные колебания электронной плотности и деформации решетки, и в условиях, когда дрейфовая скорость электрона превосходит скорость звука, мнимая часть волнового вектора оказывается отрицательной, что и ведет к генерации. Эффект особенно велик у кристаллов с большой диэлектрической проницаемостью и может превышать аналогичный эффект при других механизмах электрон-фононного взаимодействия. Эта идея получила дальнейшее развитие в цикле работ, выполненных совместно с А. А. Демиденко, В. Н. Писковым и Б. Е. Цеквавой [А. А. Демиденко, С. И. Пекар, В. Н. Писковой, Б. Е. Цеквава, ЖЭТФ, т. 52, с. 715 (1967); ФТП, т. 1, с. 1715 (1967)]. При участии С. И. Пекара были поставлены эксперименты, показавшие реальность данного механизма усиления упругих волн. Возможность управления процессом распространения волн с помощью изменения внешнего поля позволяет создавать на этом принципе различные устройства (электромеханические преобразователи, модуляторы колебаний и др.). Пропорциональное внешнему полю электрон-фононное взаимодействие приводит также к особенностям рассеяния носителей тока и к интересной немонотонной зависимости тока от поля А, А. Демиденко, С. И. Пекар, В. Н. Писковой, Б. Е. Цеквава, ЖЭТФ, т. 50, с. 124 (1966)].

Фактически работы Пекара С. И. по новому механизму электрон-фононного взаимодействия инициировали работы по акусто-электронике в ИФП, которые продолжаются и развиваются в институте в более широком контексте, включая теорию акустоэлектронных явлений в квантовых гетероструктурах (см. ниже), эксперименты по ультразвуку, тестирование и обработку полупроводниковых материалов и структур.

Спустя многие десятилетия после работы 1965 г., при исследовании наноструктур открылись новые приложения Пекаровского механизма электрон-фононного взаимодействия. Действительно, в наноструктурах могут существовать гигантские встроенные электрические поля (до 10^6 В/см). В этом случае Пекаровский механизм может быть существенным для материалов с обычными значениями диэлектрической проницаемости. Было показано, что для актуальных Si-MOSFET структур при низких температурах диссипируемая электронами мощность объясняется именно Пекаров-

ским электрон-фононного взаимодействием [B. A. Glavin, V. A. Kochelap, and T. L. Linnik, K. W. Kim, Phys. Rev. B, v. 71, 081305(R) (2005)].

В 1966—1969 годах С. И. Пекар (совместно с В. Н. Мальневым) выполнил цикл работ по исследованию свойств газов с высокой концентрацией электронно-возбужденных атомов (молекул) [В. Н. Мальнев, С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 52, с. 1811 (1966)]. Было показано, что в таких системах существенную роль может играть диполь-дипольное взаимодействие, значительно более сильное, чем взаимодействие Ван дер Ваальса. Установлено, что в газах с высокой концентрацией возбужденных частиц отклонения от неидеальности наступают уже при невысоких давлениях, могут происходить фазовые переходы в состояния, характеризующиеся расслоением газа на две фазы с разными плотностями возбужденных частиц, возможна конденсация и другие эффекты. Эти работы положили начало исследованиям фотофаз вещества и переходам между ними.

В 1969 г. С. И. Пекар предложил принципиально новый тип газовых лазеров [С.И. Пекар, ДАН СССР, т. 187, с 555 (1969)], действие которых основано на использовании фотостимулированных химических реакций. В обычных химических лазерах возбужденные молекулы, образующие среду с инверсной заселенностью, возникают в результате термических реакций исходных молекул, а стимулированное излучение связано с фотопереходами между электронными уровнями готовых продуктов реакции. Идея Пекара основана на возможности стимулирования элементарных актов химических реакций, при которых электронная перестройка сталкивающихся исходных молекул, приводящая к образованию продуктов реакции, сопровождается фотопереходом. Фотоны соответствующей частоты вызывают вынужденные фотопереходы и стимулируют такие реакции, приводящие в свою очередь к появлению новых фотонов. На этой основе могут быть сконструированы лазеры, использующие фотостимулированные химические реакции и обладающие рядом необычных характеристик (фотостимулированные реакции могут быть термодинамически обратимыми, и лазеры могут иметь очень высокий КПД). Практическая реализация этой идеи не проста, и в дальнейшем С. И. Пекар (совместно с В. А. Кочелапом) уделял много внимания детальному развитию теории лазеров на фотостимулированных реакциях и анализу возможностей их практического создания. Научные результаты, полученные в этой области были обобщены в моногра-

фии Кочелап В. А., Пекар С. И. «Теория спонтанной и стимулированной хемилюминесценции газов», («Наукова Думка». 1986 г.)

С. И. Пекар был наделен ярким и оригинальным талантом. Он проявился и в выборе тем его основных работ, и в подходе, который он находил для решения возникающих задач. Связи их с другими работами того времени вначале были незримыми, работы представлялись вроде бы изолированными, непонятно как возникшими. Но проходило несколько лет, и картина менялась. Тесная связь с современностью становилась очевидной, явно проявлялось и влияние работ Пекара на других исследователей и уже казалось непонятным, почему необходимость в такой работе не была ясна сразу.

Соломон Исаакович обладал редким складом ума, который позволял ему строить свои работы и оценивать чужие не сопоставлением их с другими работами последнего времени, а исходя из «первых принципов». Он всякий раз логически проходил всю нить рассуждений от «начал» до данной конкретной работы. Это позволяло ему избегать широко распространенных заблуждений или предрассудков, находить наиболее последовательный ход рассуждений.

Значение деятельности С. И. Пекара определяется не только его научными результатами. Он был блестящим педагогом и много внимания уделял воспитанию молодых ученых. Эта сторона его деятельности привела к созданию первой школы физиков-теоретиков в Киеве. В 1944 г. С. И. Пекар возродил кафедру теоретической физики в Киевском университете, а в 1948 г. при этой кафедре впервые была создана специализация, готовящая физиков-теоретиков. Курсы лекций по теоретической физике, которые читал Соломон Исаакович, оказали огромное влияние на несколько поколений студентов физического факультета КГУ, приобщив их к основам современной науки. Его лекции отличались необычайной ясностью и глубиной, и часто являлись событием для слушателей. Одновременно С. И. Пекар создал и возглавил теоретический отдел в Институте физики АН УССР, а с 1960 г. — в Институте полупроводников АН УССР. Вокруг него собирается группа сотрудников и аспирантов. Ученики Соломона Исааковича и ученики его учеников составили основу коллективов теоретиков в Киеве, Кишиневе, Донецке. Многие теоретики, работающие сегодня в разных городах

Союза, причисляют себя к «школе С. И. Пекара».

По инициативе и под руководством С. И. Пекара в течение тридцати лет регулярно проводились Всесоюзные совещания по теории полупроводников, оказавшие большое влияние на развитие исследований в данной области и на воспитание молодых теоретиков.

Научные заслуги С. И. Пекара отмечены избранием его академиком АН УССР (в 1961 г.), Государственной премией УССР (1981 г.). Он был награжден орденом «Знак почета», двумя орденами Трудового Красного Знамени.

Жизнь Соломона Исааковича, внешне лишённая ярких событий, не была легкой. Даже в первые послевоенные годы, когда блестящие научные достижения создали вокруг него своеобразный ореол, ему нередко приходилось растрчивать силы в борьбе с научным консерватизмом, отстаивая для себя и своего отдела право заниматься делом, которое впоследствии получило всеобщее признание. Но Соломон Исаакович никогда не терял оптимизма, внутренней бодрости, присутствия духа. Все эти качества были направлены на работу, и к такой же сосредоточенной, целеустремленной работе он стремился приучить своих сотрудников. Это всегда делалось мягко, без нажима, личным примером. Он всегда избегал мелких административных конфликтов, но был непримирим в вопросах принципиальных: при оценке уровня и качества научных работ, при выборе научной тематики, при решении судьбы молодых ученых. Благодаря именно этим качествам С. И. Пекара открылся путь в науку многим молодым теоретикам, определился их научный стиль и нравственный облик. При обсуждении научных проблем он был требователен и справедлив, стремился вскрыть слабые места обсуждаемых работ и тут же оказать максимальную помощь для преодоления возникавших трудностей. Особенно требовательным Соломон Исаакович был к собственным работам, в которых тщательно продумывал все детали. Не будучи человеком «контактным», легко и быстро устанавливающим простые отношения с малознакомыми людьми, он в то же время был очень доброжелателен и внутренне демократичен. И так он работал почти до самого конца, до смерти, наступившей 8 июля 1985г.

Учитывая огромный вклад в развитие теории твердого тела, Национальная Академия Наук Украины учредила премию им. С. И. Пекара за вы-

даючі досягнення в області теорії твердого тіла. Лауреатами премії ім. С. І. Пекара стали видні дослідники, працюючі як в Україні, так і за її межами, серед них Барьяхтар В. Г., Рашба Э. Й., Боголюбов Н. Н. (мл.), представники наступних поколінь наукової школи С. І. Пекара - Кочелап В. А., Васько Ф. Т., Шека В. І. і Райчев О. Э.

Толпыго Кирилл Борисович.

К. Б. Толпыго широко відомий своїми дослідженнями по теорії твердого тіла. Разом з С. І. Пекаром він розвивав багатореелектронну теорію кристалів: розробляв ефективний метод урахування багатореелектронної кореляції в зонній теорії, метод ефективної маси.



Член-корреспондент НАНУ, професор Кирилл Борисович Толпыго.

Його роботи 1949—1956 років відкрили собою новий етап в розвитку динамічної теорії кристалічних ґраток: в них вперше було послідовно розглянуто адиабатичне наближення, що дозволяє розглядати деформацію електронних оболонок іонів при колибанні ядер. Одночасно вперше були розглянуті оптичні колибання з урахуванням запозднання, і отримані змішані стани фотонів і фононів, значно пізніше досліджованих експериментально, і отримавши назву поляритонів. В наступному ця теорія була обобщена на гомеоплярні і молекулярні кристали. В динаміку яких, таким чином, були введені далекодіючі кулоновські сили. На цій основі була розвита мікроскопічна теорія локальних станів

электронов малого радиуса. Эта теория позволила рассматривать взаимодействие их с фононами всех ветвей и любых волн и была успешно применена к теории поляритонов, F-центров и экситонов в щелочно-галогидных кристаллах.

Им была предложена теория дефектообразования при поглощении света из глубины собственной полосы. Разработана теория гашения световой волны при падении ее на полубесконечный кристалл. Построена микроскопическая теория черенковского излучения как результата генерации светоэкситонов полем быстрого электрона.

Далее следует отметить многочисленные работы К. Б. Толпыго по феноменологической теории полупроводников: теории термоэмиссии, фото-э.д.с., теории р-п-переходов, поверхностных явлений и др.

Динамика решетки изучалась в работах К. Б. Толпыго. Одновременно с работами М. Борна, М. Гёпперт-Майер, и К. Хуанга, профессор Толпыго развил микроскопическую теорию динамики кристаллов, показал, что эффективный заряд ионов в полярных кристаллах не является целым, выяснил границы применимости такой фундаментальной характеристики твердых тел как диэлектрическая проницаемость и пр.

Рашба Эммануил Иосифович.

Эммануил Иосифович Рашба родился в Киеве в 1927 г., в 1949 г. окончил физический факультет Киевского Государственного Университета, где слушал лекции С. И. Пекара, А. С. Давыдова, Н. Н. Боголюбова, К. Б. Толпыго. В университете его научной работой руководили Пекар С. И. и Давыдов А. С. В течении нескольких лет он работал инженером и учителем, в свободное время занимаясь теоретическими исследованиями экситонов. В 1954 г. Рашбу Э. Й. приняли в отдел полупроводников академика В. Е. Лашкарева в Институте Физики АН УССР, где он тесно работал с экспериментаторами, вместе с К. Б. Толпыго развивал теорию переноса носителей тока в полупроводниках. Одним из важных результатов, полученных в то время, было построение вольт-амперной характеристики выпрямляющих диодов и р-п-переходов в пределе больших смещений (ток пропорционален квадрату приложенного напряжения – «закон Рашбы-Толпыго-Носаря») [Рашба Э. Й., Толпыго К. Б., ЖТФ, т. 26. с. 1419 (1956), Рашба Э. Й., Носарь А. И., ЖТФ, т. 27. с. 1431 (1957)]. Одновременно Рашба Э. Й. продолжал свои исследова-

ния по экситонам [Рашба Э. И., Оптика и спектроск. т. 2, с. 75, (1957); Оптика и спектроск. т. 2, с. 75, (1957)]. В 1956 г. по этим результатам он защитил кандидатскую диссертацию.



Первый руководитель отдела теории полупроводниковых приборов ИФП, лауреат Ленинской Премии, профессор Рашба Эммануил Иосипович.

Исследования по теории экситонов стимулировались также новыми экспериментальными результатами, полученными в отделе спектроскопии ИФ АН УССР (отдел академика А. Ф. Приходько). Один из таких результатов – обнаружение спектральных полос с аномальным поглощением, которые не могли быть прямо приписаны экситонам, однако имели существенную поляризацию подобную экситонам. Рашба Э. И. решил проблему этих спектров, построив теорию слабо связанных локализованных экситонов. Он нашел, что поляризация и интенсивность примесных полос демонстрируют сильные аномалии, когда они оказываются близки к собственно экситонным полосам [Рашба Э. И., Оптика и спектроск. т. 2, с. 568, (1957)]. Позже, уже в Институте физики полупроводников, подобное явление было изучено Рашбой Э. И. для экситонов Ванье-Мотта. В спектроскопии кристаллов этот эффект – гигантское увеличение силы осциллятора – получил название эффекта Рашбы. Экситонными явлениям Рашба Э. И. продолжал интересоваться и заниматься и в стенах ИФП.

Отдел В. Е. Лашкарева в ИФ концентрировался на изучении кинетики фотопроводимости в гексагональных кристаллах A_2B_6 типа CdS и Рашба Э. И. занялся особенностями оптических спектров этих кристаллов. Для этого пришлось изучить и применить теорию групп. В результате был дан полный анализ зонной структуры кристаллов без центра инверсии, включая

спин-орбитальное взаимодействие [Э. И. Рашба, Sov. Phys. Solid State v. 1, с. 368 (1959); Э. И. Рашба и В. И. Шека, Fizika Tverdogo Tela – Collected Papers, Vol. II (Acad. of Sci. of USSR, Moscow-Leningrad, (1959), p. 162].

На этих результатах следует особо остановиться. До работ Э. И. Рашбы спин-орбитальному взаимодействию не уделялось особого внимания. Существовала работа Г. Дрессельхауза [G. Dresselhaus, Phys. Rev., v.100, p.580 (1955)], где был введен гамильтониан спин-орбитального взаимодействия пропорциональный кубу волнового вектора носителя. В работе Рашбы Э. И. впервые был введен и обоснован член, описывающий это взаимодействие, линейный по волновому вектору в центре зоны Брюллюена.

Этот результат позволил предсказать новый резонанс, возникающий по действием электрического поля и приводящий к перевороту спина [Э. И. Рашба, ФТТ, т. 2, 1224 (1960)]. Отметим, что работа была одобрена академиком Л. Д. Ландау. Таким образом, исследования привели к предсказанию комбинированного резонанса, при котором спин-орбитальная связь, приводящая к «запутыванию» движения в конфигурационном и спиновом пространстве, делает возможным новый тип перехода, возбуждаемый электрическим вектором высокочастотного поля и сопровождающийся изменением эффективного спинового момента. По интенсивности комбинированный резонанс может значительно превышать парамагнитный резонанс и особенно силен он в кристаллах без центра инверсии; его частоты равны линейным комбинациям частот парамагнитного и циклотронного резонансов.

Начавшись в ИФ, работы Рашбы Э. И. по спин-орбитальному взаимодействию были продолжены в ИФП с участием молодых, в то время, Шеки В. И. и Бойко И. И. Спин-орбитальная связь приводит также к возникновению особой зонной структуры, при которой экстремум энергии достигается на окружности -- петле экстремумов, а изоэнергетические поверхности при малых значениях энергии являются торами. Электронные свойства таких полупроводников весьма специфичны, в частности, значительное число носителей может иметь отрицательную массу [И. И. Бойко и Э. И. Рашба, ФТТ, т. 2, 1692 (1960)]. Были предсказаны и другие явления, связанные со спин-орбитальным взаимодействием в кристаллах без центра инверсии, которые стали стандартным методом для измерения спин-орбитальной связи.

СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ПЕТЛЯМИ ЭКСТРЕМУМОВ

I. ЦИКЛОТРОННЫЙ И КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗОНАНС В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ ПЛОСКОСТИ ПЕТЛИ

Э. И. Рашба

Исследовано поглощение радиоволн в полупроводниках со специфической зонной структурой [1], когда экстремум достигается не в изолированных точках бриллюэновской зоны, а на целой кривой (петле экстремумов) — окружности с центром на оси симметрии. Естественно, подобная структура возникает и в других решетках, в которых реализуются определенные группы волнового вектора. Шека [2] отметил, что возникновение петли экстремумов возможно и в решетках типа InSb. Независимо Гуревич¹ пришел к выводу о возможности появления петли экстремумов в целом ряде кристаллов. В последнее время Пикус и Бир² показали, что петля экстремумов должна возникать в валентной зоне InSb при наложении определенных деформаций.

Введение

В [1] было показано, что в полупроводниках с решеткой вюрцита возможно возникновение нового типа зонной структуры, при которой в определенном приближении экстремум достигается не в изолированных точках бриллюэновской зоны, а на целой кривой (петле экстремумов) — окружности с центром на оси симметрии. Естественно, подобная структура возникает и в других решетках, в которых реализуются определенные группы волнового вектора. Шека [2] отметил, что возникновение петли экстремумов возможно и в решетках типа InSb. Независимо Гуревич¹ пришел к выводу о возможности появления петли экстремумов в целом ряде кристаллов. В последнее время Пикус и Бир² показали, что петля экстремумов должна возникать в валентной зоне InSb при наложении определенных деформаций.

Данные по циклотронному резонансу в CdS [3] заставляют предположить, что в этом кристалле петля экстремумов фактически реализуется. Декстером обнаружены две группы электронов, причем одна из них связывается с системой эллипсоидов, а вторая с минимумом в точке $k=0$. Если принять эту интерпретацию и предположить [4], что минимум в точке $k=0$ соответствует симметрии Γ_4^3 в отсутствие спиновых взаимодействий, то из [4] следует, что в этой точке возникает петля экстремумов. Для ее обнаружения требуется проведение исследований при достаточно низких электронных температурах; что касается потока валентной зоны, то, согласно [3], он также расположен в точке $k=0$. При этом если поток зоны соответствует симметрии Γ_6 (что весьма вероятно, так как естественно принять, что без спиновых взаимодействий верхней является зона Γ_6 [4], а после расщепления — зона с наибольшей проекцией момента), то экстремум достигается в точке, а несколько глубже возникает дырочная зона с петлей экстремумов; в остальных случаях петля экстремумов реализуется в верхней дырочной зоне [4].

¹ Частное сообщение.

² Частное сообщение.

³ Обозначения точек симметрии такие же, как в [5-7].

Заглавная страница первой работы Э. И. Рашбы по теории комбинированного резонанса.

Наиболее полный обзор экспериментальных и теоретических исследований по комбинированному резонансу и близким эффектам был дан в обзоре E. I. Rashba and V. I. Sheka, in «Landau Level Spectroscopy», Ed. by G. Landwehr and E. I. Rashba (Elsevier, New York, 1991, p. 178.

Пионерские работы Рашбы Э. И. по комбинированному резонансу в полупроводниковых кристаллах были официально признаны открытием.

Для полноты сведений отметим, что докторскую диссертацию Э. И. Рашба защитил, работая в ИФП, в 1963 г. в Ученом совете при Ленинград-

ском Физико-Техническом институте АН СССР. Весь «киевский период» научной жизни Э. И. Рашбы отражен в его статье «Looking Back», опубликованной в *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, v. 16, p. 599 (2003).

Следующий шаг в теория спин-орбитального взаимодействия был сделан в Институте Физики Полупроводников в то время, когда появились полупроводниковые гетероструктуры. Основываясь на исследованиях, проведенных для объемных материалов, сотрудник теор. отдела №2 Васько Ф. Т. предложил гамильтониан описывающий спин-орбитальное взаимодействие в квантовых ямах [Ф. Т. Васько, Письма в ЖЭТФ, т. 30, с. 574 (1979)]. Рашба Э. И. обобщил этот результат [Ю. А. Бычков и Э. И. Рашба, Письма в ЖЭТФ, т. 39, с. 66 (1984)]. В результате этих работ были заложены основы для развития спин-орбитального взаимодействия в системах с низкоразмерными носителями тока. (Отметим, что по очевидным причинам чаще всего ссылаются на последнюю работу Рашбы Э. И. и на упомянутый выше обзор Рашбы и Шеки).

Спустя более чем 30 лет теория спин-орбитального взаимодействия, развитая Рашбой Э. И., была использована в первой работе по «спиновому транзистору» [S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* v. 56, p. 665 (1990)], где предлагалось управлять прецессией спина с помощью поля. С указанной работы началось бурное развитие новой области – спинтроники – физики процессов и приборов, основанных на управлении спинами. Появилась возможность расширить функциональные способности существующих электронных приборов, разработать принципы новых полупроводниковых устройств, в том числе квантовых компьютеров. Без сомнения, работы Рашбы Э. И., в том числе выполненные в ИФП НАНУ, являются сейчас наиболее цитируемыми в научной литературе по твердому телу, полупроводникам и полупроводниковым приборам.

В 1966 г. за работы по теории экситонов в кристаллах профессор Рашба Э. И. получил Ленинскую премию в составе группы ученых, которая включала сотрудников ЛФТИ им. Йоффе А. Ф. (Е. Ф. Гросс, Б. П. Захарченя, А. А. Каплянский) и ИФ НАНУ (А. С. Давыдов, А. Ф. Прихотько, В. Л. Броуде, А. Ф. Лубченко, М. С. Бродин).

В ИФП интересы Э. И. Рашбы не ограничивались только упомянутыми выше экситонными эффектами, зонной структурой и спин-орбитальным взаимодействием. Предвидя тенденции развития полупроводниковых приборов и структур в сторону существенного уменьшения пространственных масштабов, Рашба Э. И. предложил серию идей о новых размерных эффектах, возникающих при приближении приборных размеров к характерным физическим длинам. Так появились размерные эффекты, связанные с рекомбинационной длиной в биполярных материалах, с междолинной релаксационной длиной в многодолинных полупроводниках, с длиной остывания носителей разогретых электрическим полем и т. д. В этих работах принимали участие как сотрудники теор. сектора (З. С. Грибников, И. И. Бойко, В. А. Кочелап, В. В. Митин, В. Н. Соколов, Н. А. Прима), так и экспериментаторы. Первые совместные работы теоретиков и экспериментаторов были выполнены с группой Романова В. А. [Э.И.Рашба, И.И.Бойко, В.А.Кочелап, З.С.Грибников, В.А.Романов, И.П.Жадько, Journ.Phys.Soc. Japan, v.21, Supplement, p. 351, (1966)]. Затем направление, предложенное Э. И. Рашбой, стало одним из основных для всего Института физики полупроводников (достаточно назвать номера экспериментальных отделов, в которых изучались и изучаются до сих пор размерные эффекты: №№ 3, 10, 15, 24, 25). Некоторые из этих работ будут упомянуты в связи с другими сотрудниками теоретических отделов. Здесь же укажем один из таких эффектов, носящих имя Рашбы, электрический пинч-эффект в анизотропных материалах – контролируемое полем накопление электронов и дырок у одной из поверхностей полупроводника. Другим важным и неожиданным явлением открытым Рашбой Э. И. является размерное междолинное перераспределение. Обобщенный анализ теории и экспериментов в этой области дан в обзоре Э. И. Рашба, З. С. Грибников и В. Ю. Кравченко, УФН. т. 19, с. 361 (1976). Наконец отметим, что усилиями сотрудников института Романова В. А., Жадько И. П. и Малютенко В. К. работы в области размерных эффектов привели к созданию целой линейки новых приборов, в том числе тензодатчиков, инфракрасных детекторов и излучателей, и т. п.

В 1967 г. Эммануил Иосифович Рашба перешел в Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, где заведовал отделом теории полупроводников. Он продолжал активную исследовательскую карьеру, сочетая ее с работой в самом престижном физическом журнале СССР – Письмах в ЖЭТФ, где с 1973 по 1988 гг. был редактором. Он сохранял и сохраняет до

сих пор активные связи с ИФП, о чем свидетельствуют цитированные обзоры и большое число совместных научных публикаций. Вклад Рашбы Э. И. в развитие науки на Украине, в частности, оценен присуждением ему в 2007 г. Премии НАН Украины им. С. И. Пекара за выдающиеся достижения в области теории твердого тела. В 1987 г. он получил престижную премию АН СССР им. А. Ф. Иоффе. В 1991 г. Э. И. Рашба переехал в США, где продолжает активно работать как профессор Гарвардского университета, являясь также почетным профессором ряда других престижных университетов США. Научный авторитет его огромен, он отмечен рядом международных научных наград, в его честь проводятся международные конференции [Alan Berman Res. Publ. Award of Naval Res. Lab (USA) – 2001; Symposium in Honor of E. I. Rashba (Boston) – 2002; NATO Adv. Res. Workshop on Frontiers of Spintronics & Optics; The Sir Nevill Mott Lecture (United Kingdom) – 2005; Symposium in Honor of E. I. Rashba, Frontiers of Spintronics, Cambridge, Ma – 2008); Special issue of the «International Journal on Superconductivity and Magnetism» Frontiers of Spintronics and Optics in Semiconductors: In Honor of E. I. Rashba, v. 16, No. 4, (2003)].

В работе теоретического сектора важную роль играл Дыкман Исаак Маркович, который с 1968 г. по 1983 г. был заведующим отделом №2. Спокойный, рассудительный, обладающий большими знаниями в области теории твердого тела и работоспособностью, Дыкман И. М. сотрудничал со многими теоретиками в ИФП и в ИФ. Он преподавал в Киевском университете (автор этих заметок слушал его отличный курс лекций по теории твердого тела). Дыкман И. М. имел большое число молодых сотрудников и аспирантов (Толпыго Е. И., Григорьев Н. Н., Алмазов Л. А. и др.). Среди его учеников - чл.-кор. НАНУ, заведующий отделом теоретической физики ИФ НАНУ Томчук П. М., профессор Васько Ф. Т. и многие другие, активно работающие в области теории по настоящее время. В ИФП основной тематикой Дыкмана И. М. была теория электронных кинетических явлений в сильных полях, в этой области им были разработаны общие вопросы теории горячих электронов. В частности, он детально исследовал кинетику носителей со сложным законом дисперсии (непараболичность, анизотропия, и пр.), явления увлечения неосновных носителей заряда основными, а также такую сложную задачу, как влияние электрон-электронных соударений на кинетические явления в электрическом и магнитном полях. Многочисленные результаты Дыкмана И. М. по теории горячих электронов были обобщены в одной

из первых книг в этой области знаний [Дыкман И. М., Томчук П. И., «Явления переноса и флуктуации в полупроводниках», Киев, Наукова Думка (1981)].



Доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом теории полупроводников и полупроводниковых приборов в 1968 -1983 гг. Дыкман Исаак Маркович.

Исаак Маркович Дыкман оставил после себя не только научных учеников, он воспитал сына – хорошего физика теоретика. М.И. Дыкман работал в ИПАН УССР с 1972 по 1991. В 1973 защитил кандидатскую, а в 1984 – докторскую диссертации. Под его руководством были защищены три кандидатские диссертации (Г. Г. Тарасовым, С. М. Соскиным и В. Н. Смелянским). Научные результаты, полученные М. И. Дыкманом за время работы в ИПАН относятся к физике колебательных систем, нелинейным оптическим эффектам в твёрдом теле и физике двумерных систем. В сотрудничестве с М.А. Кривоглазом, и др., он развил классическую и квантовую теорию флуктуационных спектров слабодемфированных осцилляторов. [Physica Status Solidi (b) 48, 497 (1971); ЖЭТФ 64, 993 (1973); ЖЭТФ 68, 2082 (1975); Phys. Rev. A 42, 7041 (1990)]. Значительным результатом является теория больших флуктуаций и выброса из метастабильного состояния системы под действием Гауссова шума, это были первые результаты по шумоиндуцированному выбросу для системы без детального баланса [ЖЭТФ 77, 60 (1979); Physica 104 A, 480 (1980); ЖЭТФ 94, 61 (1988); Phys. Rev. A 42, 2020 (1990)]. Важные результаты были получены по оптике кристаллов, среди них: предсказан самоиндуцированный поворот плоскости поляризации, развита теория резонансной поляризации-зависимой оптической нелинейности и др. [ЖЭТФ 72, 2246 (1977); ЖЭТФ 74, 1061 (1978)].

Была также разработана теория много-электронного транспорта в сильно-коррелированных двумерных электронных системах, и предложен много-электронный механизм магнетотранспорта, в том числе для двумерных Вигнеровских кристаллов [ЖЭТФ 77, 1488 (1979); 81, 1377 (1981); 82, 1318 (1982)]. В настоящее время М. И. Дыкман – профессор физики в Michigan State University at Lansing (USA).

Грибников Зиновий Самойлович.

Грибников З. С. пришел в теор. сектор ИФП в 1964 г., будучи уже кандидатом физ.-мат. наук. Диссертационную работу он выполнил и защитил под руководством Толпыго К. Б., работая инженером в отраслевом НИИ. В ИФП Грибников З. С. работал младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником (с 1966 г.), заведующим лабораторией полупроводниковых приборов (с 1983 г.), главным научным сотрудником (с 1997 г.). В 2000 г. Грибников З. С. переехал в США, где продолжает заниматься научными исследованиями в Мичиганском университете в г. Анн-Арбор, штат Мичиган.

З. С. Грибников всегда был одним из признанных научных лидеров как в теор. секторе, так и в целом в ИФП. Яркий, чрезвычайно талантливый человек, он сочетает в себе способности теоретика высокого класса и дар отличного физика и инженера, глубоко понимающего тонкости экспериментальных исследований. Он способен анализировать и решать теоретические и математические проблемы любого уровня сложности, от феноменологии до микроскопической квантовой теории. Он хорошо знает и разбирается в самых современных и «продвинутых» технологических и приборных разработках. Именно такое сочетание позволило ему заслужить глубочайшее уважение научного сообщества. В тоже время, как и многие неординарные личности, Грибников З. С. обладает сложным характером. Он остер на язык, резок в суждениях, вещи называет своими именами, часто не соблюдает никакой субординации, что во многом усложняло ему жизнь. В теоретическом отделе его любили и уважали. В ИФП его уважали и побаивались, начинающие и опытные экспериментаторы приходили к нему за консультацией и обсуждением, его мнение часто было решающим при оценке результатов работы.

Обладая огромной работоспособностью, за время работы в ИФП Гриб-

ников З. С. опублікував около 200 повноцесних науцних работ, каждая из которых обладала оригинальностью, находилась на самом переднем фронте исследований по физике полупроводников и приборов. Здесь не представляется возможным дать полный анализ его результатов. Укажу лишь некоторые из них, отложившиеся в моей памяти как важнейшие.



Заведуючий лабораторією полупроводникових приборов,
профессор Грибников Зиновий Самойлович.

В начале 60-х годов Грибников З. С. вместе с Рашбой Э. Й. начал цикл исследований, посвященных размерным эффектам в полупроводниках. Эта активность была ответом на известные тенденции в полупроводниковых технологиях и разработках новых – последовательное уменьшение характерных размеров с целью увеличения их быстродействия и наращивания степени сложности микросхем (закон Г. Мура – Gordon Moore law). При уменьшении размеров полупроводниковой структуры, когда хотя бы один из масштабов сравнивается с длиной, характеризующей релаксационный процесс, возникает зависимость электрических и др. свойств структуры от размеров и свойств границ структуры – размерный эффект на соответствующей длине. Оказалось, что существуют значительные размерные эффекты, связанные с рекомбинационной длиной в биполярных материалах, с междолинной релаксационной длиной в многодолинных полупроводниках (в частности таких как кремний, германий), с длиной остывания носителей разогретых электрическим полем и т. д. Отметим, что до работ, проведенных в ИФП, широко был известен лишь один размерный эффект на длине свободного пробега (эффект Фукса).

Работая над размерными эффектами, Грибников З. С. использовал как уравнения феноменологической теории электропереноса, так и кинетическое уравнение Больцмана. Уравнения феноменологической теории использовались для исследований размерных эффектов на макроскопических длинах, в биполярных и многодолинных полупроводниках. Задачи оказались сложными, что было связано со значительной нелинейностью уравнений, необходимостью использовать разнообразные граничные условия и пр. Здесь в полную меру проявились способности Грибникова З. С. вникать в суть проблемы и находить те малые (или большие) параметры, использование которых позволяло не просто находить решения, но обнаруживать качественно новую физику. Участвуя также в этих исследованиях, я получал первые важные уроки от Грибникова З. С. Один из них был таким. Изучая простейший многодолинный кристалл – двухдолинный полупроводник, для предела больших полей я нашел решение, которое описывало расслоение образца на две области, в каждой из которых присутствовали электроны только одной из долин и поперечное электрическое поле определенного знака. Рашба Э. И. заставил меня перебрать все возможные варианты постоянных интегрирования и сделать общий анализ на фазовой плоскости, После чего согласился с результатом, сформулировав его как образование электрических анизотропных доменов и указав простое правило определения размеров доменов. Каково же было мое удивление, когда спустя короткое время Грибников З. С. показал, что подобные домены образуются в полупроводнике с произвольным числом долин, нашел последовательность расположения и размеры всех доменов. А ведь ему пришлось анализировать не одно уравнение как мне, а $(N-1)$ уравнений при числе долин N ! Он показал, как можно построить асимптотические по большому полю решения системы состоящей из $(N-1)$ нелинейного уравнение [З.С.Грибников, В.А.Кочелап, Э.И.Рашба, ЖЭТФ, т. 51, с.266 (1966); ФТТ, т.8, с .2479 (1966)]. Лишь спустя время, я понял, что метод, который придумал Грибников З. С., был одним из интуитивных вариантов сингулярной теории возмущений для нелинейных дифференциальных уравнений. Среди других результатов Грибникова З. С. по тематике размерных диффузионных эффектов, я бы выделил еще работы по магнитоконцентрационному эффекту. Где авторы предсказали и обнаружили экспериментально отрицательную дифференциальную проводимость и осцилляции тока [З.С.Грибников, К.Ю.Гуга, Ю.М.Малозовский, В.К.Малютенко, Письма ЖЭТФ, т.29, с.290 (1979)]. Эта работа Грибникова З. С. является одной из немногих, в которых построе-

на теория отрицательного дифференциального сопротивления нелокальной природы (см. ниже).

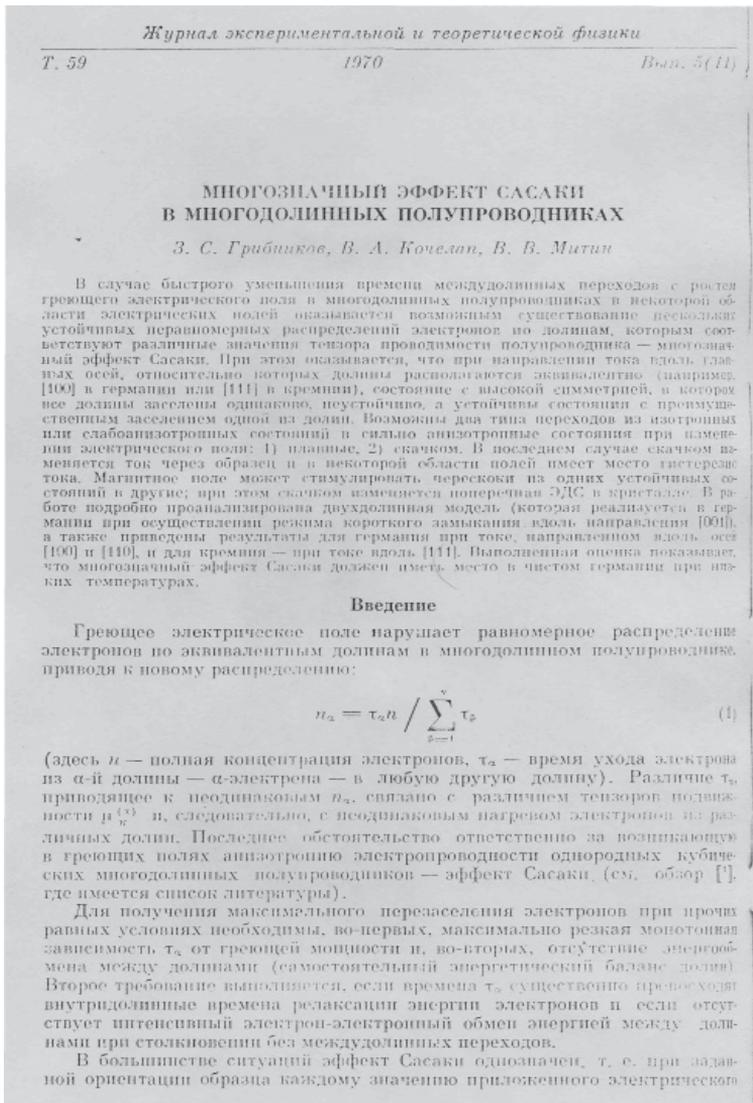
Еще более сложной являлась теория размерных эффектов на длине остывания, связанных с пространственно неоднородными распределениями горячих электронов. Изучение таких эффектов возможно лишь на основе решения полного кинетического уравнения. Грибников З. С. совместно с Мельниковым В. И. справились со сложными проблемами и построили соответствующую теорию размерных эффектов для горячих электронов [З.С.Грибников, В.И.Мельников, Т.С.Сорокина, ФТТ, т. 8, с. 3379 (1966); ЖЭТФ, т.51, с.1909 (1966)]. Позднее размерный эффект на длине остывания был экспериментально изучен в деталях в ИФП Снитко О. В. и Климовской А. И. [Klimovskaya A. I., Snitko O. V., Mel'nikov V. I., in Proceedings of 9-th International Semiconductor Physics Conference, Nauka, Leningrad, 1969, v. 2. p. 848].

Следующим, на чем мне хотелось бы остановить внимание, является цикл работ по многозначной анизотропии проводимости в многодолинном полупроводнике в сильном электрическом поле. Вклад Грибникова З. С. в эти работы является определяющим. Эта многолетняя активность началась так. Под впечатлением работ по горячим электронам и многодолинной «размерной» тематики я с Митиным В. В. изучал междолинное перераспределение носителей при различных механизмах междолинных переходов (см. ниже). Междолинное рассеяние на фононах оказалась резкой функцией от средней электронной энергии. Простые соображения показывали, что малая флуктуация поперечного поля индуцируют такое междолинное перераспределение, которое вместо компенсации флуктуационного поля ведет к его увеличению. Мы построили теорию устойчивости системы горячих электронов по отношению к указанным флуктуациям и увидели, что при определенных значениях приложенных электрических полей система теряет устойчивость - нарастают флуктуации с отличной от нуля компонентом поперечного поля. Результат казался интересным и мы пошли обсуждать и «апробировать его» на Грибникова. З. С. Грибников поддержал наши выводы, но ответа на его вопрос к чему приведет неустойчивость мы не имели. На следующий день утром, а это была суббота, мне позвонил З.С., он сказал, что знает, что произойдет в результате нашей неустойчивости, и пригласил меня к себе домой. Когда я пришел к нему, он рассказал, что неустойчивость должна приводить к новым состояниям кристалла с возникновением электрической анизотропии, поддерживающейся меж-

долинним перезаселением носителей и продемонстрировал упрощенную модель явления. Такое явление могло быть квалифицировано как неравновесный аналог фазового перехода. Критическим параметром являлось тянущее электрическое поле. Условно, переход, соответствующий ситуации предварительно рассмотренной нами с Митиным В. В., можно было отнести к переходам второго рода. Следующие пару месяцев Грибников З. С., Митин В. В. и я разрабатывали уже теорию нового явления. В результате появилась работа, в которой были предсказаны и полностью проанализированы спонтанно возникающие неравновесные состояния полупроводника с электрической анизотропией и междолинным перераспределением.

Новые состояния могли возникать как переходы второго рода, так и как переходы первого рода. Исходные наши соображения по устойчивости/неустойчивости полупроводника вошли в работу малым фрагментом [З.С.Грибников, В.А.Кочелап, В.В.Митин., ЖЭТФ, т.59, с.1828 (1970)]. Хочется особо подчеркнуть, что эта работа с Грибниковым З. С. лично меня научила очень многому. На самом деле работа, на истории которой я остановился, оказалась первой из большого цикла, в котором Грибников построил исчерпывающую теорию многозначной анизотропия проводимости в многодолинных полупроводниках. В частности, была построена теория неоднородных состояний (электрически анизотропных доменов) в сильном электрическом поле [З.С.Грибников, В.В.Митин, Письма ЖЭТФ, т.14, с.272 (1971); Solid-State Electron., v.68, p.153 (1975)] и пр. Следует подчеркнуть, что это были чрезвычайно сложные и красивые исследования, аналоги подобных по сложности исследований мне неизвестны. В 1980 г. группой Сарбея О. Г. из ИФ АН УССР и Аше М. (Центральный институт электронной физики, Берлин, ГДР) была дано экспериментальное подтверждение теоретически предсказанного эффекта для кристаллов кремния [Ashe M., Kostial H., Sarbey O. G., J. Phys. C: Sol. St. Phys., v. 13, p. L645 (1980)]. За указанной работой последовал большой цикл экспериментальных и совместных теоретических и экспериментальных работ, в котором явление многозначной анизотропия проводимости было детально исследовано. Обобщение результатов было дано в ряде обзоров и монографии М.Оше, З.С.Грибников, В.В.Митин, О.Г.Сарбей, «Горячие электроны в многодолинных полупроводниках», Киев, Наукова Думка, 1982, 325 с.

В 1985 г. явление «Многозначная анизотропия проводимости в полупроводниках» было признано открытием (диплом СССР на Открытие №294 от 1985 г.).



Заглавная страница первой работы по многозначной анизотропии проводимости в полупроводниках.

Упомяну еще одну работу, выполненную Грибниковым З. С. и мной, в которой было обнаружено необычное поведение электронного газа в сильном электрическом поле [З. С. Грибников, В.А.Кочелап, ЖЭТФ, т.58, N3, сс.1046-1056, 1970)]. В этой работе мы нашли, что в условиях сильно неупругого рассеяния носителей по энергии средняя энергия носителей может не только не увеличиваться, что типично для горячих электронов, но может уменьшаться с ростом поля и достигать значений более низких, чем температура решетки. Явление охлаждения носителей в сильном поле является достаточно необычным и возникает при формировании функции распреде-

ления носителей очень нестандартного вида («патологическая» функция распределения, по определению проф. Левинсона И. Б.). Это явление привлекло внимание теоретиков, в том числе спустя много лет рассматривалось для низкоразмерных электронов. Экспериментально явление наблюдалось в Институте физики полупроводников Лит. ССР (Вильнюс) для кристаллов InSb.

Следует отметить также другие циклы работ Грибникова З. С. по горячим электронам, где рассматривались ударная ионизация и пробой [ЖЭТФ, т. 74, с.2112 (1978); Phys.Stat.Solidi (b), v.105, p. 451 (1981); ФТП, т. 15, с. 1372 (1981)], разогрев электронов в высокочастотных полях [Ф.Т.Васько, З.С.Грибников, Письма ЖЭТФ, т.21, с. 629 (1975); Ф.Т.Васько, З.С.Грибников, В.М.Иващенко, ФТП, т.21, с. 251 (1987)], контактные и инжекционные явления с участием горячих электронов [Письма ЖЭТФ, т.6, с. 900 (1980), ФТП, т.21, с. 251 (1987)] и другие эффекты.

Среди работ Грибникова З. С. по горячим электронам особое место занимает работа «Отрицательная дифференциальная проводимость в многослойной гетероструктуре» [ФТП, т.6, с. 1380 (1972)], в которой автор впервые ввел перенос электронов в реальном пространстве в искусственно созданной структуре (гетероструктуре). Он показал, что можно существенно изменять электрические характеристики структуры и достигать отрицательного дифференциального сопротивления при очень малых характерных временах переноса. Фактически, эта работа открыла новый путь к созданию приборов с падающими вольт-амперными характеристиками для усиления и генерации сверхвысокочастотного излучения. Судьба этой работы оказалось не простой. Первое время на эту работу не обратили особого внимания, что было связано с отсутствием в СССР соответствующих технологий, а контакты с зарубежными лабораториями отсутствовали. В 1979 г. независимо появилась работа профессора Карла Гесса из The Beckman Institute for Advanced Science and Technology and Coordinated Science Laboratory, University of Illinois at Urbana/Champaign, USA [K Hess H. Morkoc, H. Shichijo, and G. B. Streetman, Appl. Phys. Lett. v. 3; 469 (1979)], в которой был предложен аналогичный путь для достижения генерации в сверхвысокочастотном диапазоне. Подчеркивалось, что имеются широкие технологические возможности для выращивания необходимых структур и создания соответствующих аналоговых приборов. Спустя несколько лет

появились эксперименты на структурах GaAs/AlGaAs [M. Keever, H. Shichijo, K. Hess, S. Banerjee, L. Wikowski, H. Morkoc, and B. G. Streetman, Appl. Phys. Lett. 38, 36 (1981)], подтвердившие существования обсуждаемого явления. Следующий шаг был сделан бывшим сотрудником ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе – Кастальским А. и сотрудниками Bell Labs, USA, которые предложили и изготовили серию приборов с использованием этого явления, в том числе быстрые трехтерминальные устройства для логических элементов, излучательные приборы и т.п. [A. Kastalsky and S. Luryi, IEEE Electron Device Lett. EDL4, 334 (1983); S. Luryi, A. Kastalsky, A. C. Gossard, and R. H. Hendel, IEEE Trans. Electron Devices ED-31, 832 (1984)]. Работы получили широкий резонанс и серьезную поддержку со стороны основных полупроводниковых лабораторий США. Проф. Кастальский А. знал работу Грибникова З. С. и процитировал ее. Тем не менее работа продолжала оставаться мало известной. В 1990 г. я первый раз посетил США, лазерную лабораторию университета в Урбане. Основной моей задачей были исследования по эксимерным лазерам. Однако, зная о работах профессора Гесса А., я посетил несколько его семинаров, сделал там доклад по шумам горячих электронов и подробно рассказал о работах Грибникова З. С., в частности о работах по переносу носителей в реальном пространстве. Профессор Гесс К. заинтересовался и спросил сможет ли Грибников приехать в США. Была достигнута договоренность о визите Грибникова З. С. в г. Урбану с целью написания совместного обзора по переносу носителей в реальном пространстве и основанных на этом явлении приборах. В помощь был выделен знающий русский и английский языки выходец из СССР Козинковский Г. В результате был написан и издан фундаментальный обзор [Z. S. Gribnikov, Karl Hess and G. A. Kosinovsky, J. Appl. Phys. v. 77, p. 1337 (1995)], в котором, в частности, изложена история открытия явления. Из списка цитированной литературы видно, что роль ИФП НАНУ в этом открытии значительна. Обзор стал на многие годы основным источником информации и идей по переносу носителей в реальном пространстве, и применению этого явления в приборах.

С конца 80-х и начала 90-х годов Грибников З. С. сосредоточился на новых явлениях реализующихся в гетероструктурах. Так вместе с Райчевым О. Э. он изучал электронный спектр в гетероструктурных квантовых ямах, электронное туннелирование между размерно квантованными подзонами, туннельную ионизацию в продольном электрическом поле, «Г-Х»-перенос в реальном пространстве и другие актуальные вопросы физики гетероструктур. В частности, был предложен транзистор использующий «Г-Х»-перенос

[З.С.Грибников, О.Э.Райчев, ЖЭТФ, т.96, с. 996 (1989); ФТП, т.23, с. 2171 (1989)].

Позже был начат большой цикл работ по использованию отрицательной эффективной массы носителей для генерации высокочастотных колебаний [С. Грибников, ФТП, т.28, с.880 (1994); Письма ЖЭТФ, т.61, с.38 (1995)]. Идеи об использовании отрицательной массы электрона для получения неустойчивостей, когда электрон движется против приложенной силы, высказывалась еще в 60-х годах будущим Нобелевским лауреатом профессором Кремером Г. В последствии многие пытались найти ситуацию, при которой эта идея могла бы быть реализованной. Трудность состояла в том, что в объемных полупроводниках всегда присутствуют оба сорта электронов, как с отрицательной, так и с положительной массой, последние нивелируют возможный эффект. Одним из достижений квантовых гетероструктур является резкое снижение темпа рассеяния носителей, возможность реализации большой длины свободного пробега, т.е. возможность осуществления баллистического транспорта. Грибников З. С. заметил, что для гетероструктур возможен «инжиниринг» закона дисперсии носителей, в том числе возможно создание участков дисперсии с отрицательной эффективной массой (вторая производная энергии по импульсу), он предложил использовать баллистический характер электронного транспорта для того, чтобы «загнать» большинство носителей в область импульсов, при которых эффективная масса отрицательна. Для самого общего случая он построил теорию неустойчивости баллистического транспорта носителей, для которых закон дисперсии имеет участок с отрицательными массами [З.С.Грибников, А.Н.Коршак, ФТП, т.28, с.880, (1994); З.С.Грибников, ФТП, т.28, с.1445 (1994)]. Затем он исследовал большое число различных конкретных реализаций предложенной схемы. Работы вызвали значительный интерес и продолжались после переезда Грибникова З. С. в США. Фундаментальность и оригинальность этих исследований позволяет думать, что они обязательно будут подтверждены экспериментально и послужат основой для нового класса высокочастотных приборов.

Я не могу останавливаться на всех теориях и идеях полупроводниковых приборов, развитых Грибниковым З. С. Перечислю только некоторые из направлений, развитые, или развиваемые им: теория монополярной и биполярной инжекции; теория диодов, биполярных и полевых транзисторов; гетероструктурные транзисторы, тиристоры, оптодиристоры; теория баллистических терагерцевых генераторов; теория инжекционных лазеров.

После переезда в США профессор Грибников З. С., не смотря на возраст, продолжает активные научные исследования. С его отъездом теоретический отдел и наш институт много потерял. Приобрел ли что-либо Грибников? Это его персональный вопрос. Следующее его четверостишие иллюстрирует его душевное состояние: «Моя американская судьба не греет обхождением джентльменским, а метит, словно чёрного раба, иль отмечает с лицемерьем мерзким.»

Остается только пожелать самого доброго человеку, сделавшему так много в стенах нашего института.

Выше уже упоминались и будут еще возникать имена д. ф.-м.н. В. Н. Пискового, д. ф.-м.н. Цеквавы и к. ф.-м.н. А. А. Демиденко, кадровых сотрудников теоретического отдела, ближайших помощников и соавторов С. И. Пекара. Я не буду останавливаться подробно на их результатах. Скажу только, что это были очень квалифицированные физики-теоретики. Выполняя большой объем работ, они умудрялись иметь множество других интересов в жизни. Само присутствие их в отделе делало атмосферу легкой, дружелюбной и притягивающей молодежь.

Вспомнив о тех кто стоял у истоков и кого уже нет с нами по разным причинам, вернемся к истории и результатам тех сотрудников, которые сегодня составляет основу теоретического отдела ИФП НАНУ.

Начну с себя и некоторых формальных дат. Как уже упоминалось, в институт я пришел студентом в 1964 г., курсовую и дипломную работу делал по размерным эффектам под руководством Рашбы Э. И. Осенью 1966 г. я был принят инженером в отдел. Кандидатскую диссертацию защитил по теории химических лазеров в 1970 г. (специальность «теоретическая и математическая физика»). С 1975 г. – старший научный сотрудник. В 1983 г. защитил докторскую диссертацию (специальность «физическая электроника, в т.ч. квантовая»). После смерти академика Пекара С. И. стал заведовать отделом. С 1987 г. - профессор по специальности «теоретическая и математическая физика». Научные вопросы, которыми мне довелось заниматься, условно можно разбить на две группы – исследования по теории лазеров и исследования в области теории твердого тела.

Начну с исследований по теории лазеров, физики неравновесных кинетических процессов в газах и теории инверсных лазерно-активных сред. Когда я пришел в институт, Э. И. Рашба фактически готовился к отъезду в

Москву. Задач мне никто не формулировал и первые пару месяцев я придумывал их сам, опираясь на тот небольшой багаж знаний по твердому телу, который имел к тому времени. В декабре Соломон Исаакович Пекар пригласил меня в кабинет и завел разговор, оказавшийся для меня совершенно неожиданным. Суть его рассуждений состояла в следующем. Известно, что при сжигании топлива выделяется свет. Как правило, горение представляет собой квазиравновесный процесс. Однако, существуют случаи, когда химические процессы являются сильно неравновесными, для них сопровождающее излучение называется хемилюминесценцией. Очевидно, что в процессах видимой хемилюминесценции участвуют электронно-возбужденные атомы или молекулы. Нужно найти такие химические реакции и условия их протекания, когда реакции приводят к инверсной заселенности электронно-возбужденных частиц. В этом случае можно было бы осуществить лазер излучающий свет за счет химической энергии реакций – химический лазер. Тогда я только и смог спросить о том, для чего такой лазер нужен. Ответ тоже был неожиданным – быстрее света нет ничего, мощный химический лазер может быть автономной боевой системой, например, зенитной. Напомню, что это был 1966 г., фильмов и романов про звездные войны еще не было. Проблема, сформулированная Пекаром С. И., была, конечно, неожиданной для меня. На самом деле, это были годы, когда только появились первые лазеры и проводился усиленный поиск как новых типов лазерных сред, так и методов их накачки. С. И. Пекар, очевидно, думал на эту тему и имел определенную идею. Идея была не очень прозрачна для меня, но суть ее сводилась к следующему. Если считать, что движение атомов (молекул) является адиабатически медленным по сравнению с движением электронов в атомах (молекулах), то исходные реагенты и конечные продукты при сближении образуют в координатном пространстве две различные поверхности, отвечающие разным электронным состояниям системы сближенных частиц (два электронных терма). По одной поверхности реагенты сближаются, по другой разлетаются продукты. Переход между этими состояниями в момент сближения и последующий разлет продуктов приводит к тому, что называется химической реакцией. В принципе, такой переход может осуществляться путем излучения (поглощения) света, т.е. через фотопереход. Если продукты реакции отсутствуют, то в момент столкновения реагентов заселяется лишь верхний электронный терм, что автоматически соответствует образованию инверсной заселенности состояний в паре сближенных частиц. Таким образом, идеальная реагирующая систе-

ма представляет собой инверсную среду, в которой для получения вынужденного излучения используется химическая энергия. Более того, осуществление вынужденного излучения означает новый канал химической реакции, которые может быть управляемым и ускоряться светом. Пекар предложил мне подумать над этой идеей и посмотреть соответствующую литературу.

Следующий разговор у меня состоялся с ним через ... год. За это время я ознакомился с литературой по химической кинетики, видимой хемилюминесценции, и пр. Нашел и две работы с идеей использования хемилюминесценции в лазерах (датированные, кстати, 1965 г.). Однако, идея, высказанная Пекаром С. И., в литературе не рассматривалась. Более того, отсутствовало само представление о химической реакции как переходе между электронными термами. Изучая химическую кинетику двухатомных и более сложных молекул, я понял, что для них идеализированный процесс движения по адиабатическим термам не реализуется – сами поверхности являются сложными функциями от многих координат, возможны пересечения поверхностей и безизлучательные переходы в силу приближенного характера адиабатического рассмотрения и т. д. Осталась надежда на простейшие реакции с участием атомов и простейших радикалов. В дальнейшем я сосредоточился именно на таких процессах – рекомбинации атомов и радикалов. Для них я построил теорию излучательной рекомбинации и нашел условия усиления света в ходе таких реакций. Вспоминая то время, я должен признаться, что делал большое число ошибок, многократно все пересчитывал и переделывал. Конечно, я каждый раз напрашивался на разговор с С.И., однако он был недоступен (типичный ответ: «я сегодня занят, давайте встретимся в пятницу», но не уточнял в какую). Пятница настала примерно через год. К тому времени я «выловил» все свои ошибки. С.И. посадил меня рядом и в течении двух недель провел все расчеты, не глядя в мои выкладки, объясняя свои действия и сверяя только результаты. Результаты совпадали. С.И. остался доволен результатами и мной. Мы написали первую статью по этой тематике «Теория фотостимулированной реакции в газах и возможность ее использования в лазерах». Не имею возможности останавливаться подробно на самом процессе работы с С.И., скажу только, что это была хорошая школа для меня. Оформленная работа какое то время пролежала, потому что СИ оформлял «закрытую заявку» на открытие «Фотостимулированные реакции и лазеры», делал доклад на Президиуме АН УССР перед академиком Б. Е. Патонем. Работа вышла только

в 1970 г. [В. А. Кочелап, С. И. Пекар, ЖЭТФ, т. 58, 854 (1970)].

Параллельно, я исследовал нелинейные режимы фотостимулированных реакций, методы получения больших концентраций атомов и радикалов и ряд конкретных схем осуществления таких лазеров. Эта деятельность мне нравилась, поскольку требовался анализ, включающий взаимосвязанные задачи из различных областей теоретической физики (включая механику сплошной среды, гидродинамику реагирующих сред, теплофизику, статфизику, электродинамику и квантовую механику). Была предложена и обоснована целая серия демонстрационных экспериментов и конкретных реализаций лазеров нового типа: рекомбинационная газодинамическая накачка, метод нагрев-охлаждения в сверхзвуковом потоке (рекомбинационные лазеры с тепловой накачкой), лазеры за фронтом ударной волны, лазеры на быстром перемешивании реагентов в потоках, на взрывах в адиабатических условиях и пр. В дальнейшем к исследованиям подключилась целая группа молодых сотрудников: Кукибный Ю. А., Измайлов И. А., позже Наумов В. В., Бармашенко Б. Д., Мельников Л. Ю., Дацюк В. В. и др. Каждый из них внес много в развитие «лазерохимической» тематики.

Отмечу, что хотя обсуждаемая тематика далека от полупроводниковых проблем, являющихся основными для института, я часто использовал «твердотельный» опыт. В качестве примера приведу решение проблемы лазерной генерации, инициированной детонационной волной. Ударная (детонационная) волна позволяет инициировать реакции, необходимые для усиления света, в газах любой плотности, Однако, протяженности неравновесной зоны и зоны усиления оказываются ничтожно малыми и дифракционные потери света всегда превышают усиление. Внимательный анализ детонационных волн показал, что на самом деле в неравновесной зоне имеется уплотнение газовой среды. Возникла идея использовать это уплотнение для локализации светового пучка, т.е. как волновод. Была развита соответствующая теория, которая подтвердила образование волновода для света, усиление и генерацию большой мощности [С. И. Пекар, В. А. Кочелап, Ю. А. Кукибный, И. И. Измайлов, Докл. АН СССР, т. 241, с. 80 (1976); Квантовая электрон. т. 6, с. 1622 (1979)].

Уместно отметить еще два обстоятельства, характерных для развития тематики мощных лазеров. Во-первых, работы проводились в условиях сильной конкуренции с московскими физиками. Рецензирование было чрезвычайно жестким. Были случаи, когда наши работы без причины задерживались и появлялись одновременно с публикациями «конкурентов».

Однако, в целом такая конкуренция способствовала интенсивным исследованиям. Во-вторых, в работах были заинтересованы «закрытые» организации министерств оборонной промышленности, среднего машиностроения и химической промышленности. Были определенные успехи при создании специальных стендов и проведении экспериментов. Однако, работы были прекращены во второй половине 80-х. Надо сказать, что сама идея химического лазера на электронных переходах как боевой системы (что предсказывал академик Пекар) была реализована в США. Был создан кислород-йодный химический лазер большой мощности, в том числе его авиационный (бортовой) вариант. Отмечу, что мы также внесли определенный вклад в разработку кислород-йодного лазера – предложили газожидкостный генератор возбужденного (синглетного) кислорода, который позволил увеличить плотность и скорость потока возбужденного кислорода и, следовательно, мощность химического лазера [Бармашенко Б. Д., Кочелап В. А., Мельников Л. Ю, Квантовая электроника, т. 12, 2047 (1985)].

Кроме исследований по химическим лазерам на электронных фотопереходах, была проведена большая работа по химической накачке лазеров с инфракрасным излучением. Среди результатов упомяну лазеры на реакциях металлов с окислителями. Для них был предложен новый способ создания реагирующей среды, решающий проблему перемешивания реагентов для сверхбыстрых химических реакций – смесь микрочастиц металла и окислителя создавалась при электрическом взрыве проводников. Теория горения, образования инверсной населенности и лазерной генерации была развита при участии аспирантов Бармашенко Б. Д. и Мельникова В. Ю. Одним из принципиальных результатов было обнаружение оптически индуцированного самоускоренного химического процесса. При активном нашем участии в ИФ НАНУ, в лаборатории академика М. Т. Шпака был реализован химический лазер на горении частиц лития в хлоре (работы проводились, в основном, в закрытом режиме; была опубликована лишь малая часть полученных результатов).

Параллельно с работами в области газовых лазеров я занимался теорией твердого тела. Уместно заметить, что, условно, теоретические работы можно относить к двум направлениям. К первому относятся исследования, развивающие технику и методы, обосновывающие фундамент последующих результатов. Ко второму относятся исследования конкретных физических процессов и явлений, их проявления и, возможно, применения. Пожалуй, только теоретики очень высокого класса, успешно работали

одновременно в двух указанных направлениях. Глядя ретроспективно на полученные мной результаты, я отношу их, скорее, ко второму направлению – исследованию новых эффектов. Выше уже упоминалось о нескольких моих работах по электрическим явлениям в полупроводниках, выполненных в начале 70-х совместно с Рашбой Э. И. и Грибниковым З. С. К этому циклу работ я хочу еще добавить работу с Митиным В. В. по предсказанию аномального эффекта электрической анизотропии в многодолинных полупроводниках [Кочелап В. А., Митин В. В. ФТП, т. 4, 1051 (1970)].

Как уже отмечалось выше, в 70-е годы в отделе активно исследовалось электрон-фононное взаимодействие, в частности усиление акустических волн дрейфом электронов. Рассматривались разнообразные механизмы электрон-фононного взаимодействия. Аспирант Пекара, Виктор Пипа (ниже я добавлю несколько слов о других его работах и его роли в теор. отделе), рассматривая взаимодействие носителей через деформационный потенциал, выключил электрическое поле и дрейф носителей и получил неожиданный результат – неустойчивость равновесной многоэлектронной системы. Пипа В. И. сформулировал критерий неустойчивости (определенный параметр пропорциональный квадрату константы электрон-фононной связи, концентрации и обратно пропорциональный температуре (или энергии Ферми) должен превышать единицу). Результат был представлен на семинаре отдела и оживленно обсуждался. Оказалось, что независимо близкий расчет по результату был получен Писковым В. Н.. Явление не было понятно и авторы результатов отправились к Пекару С. И. В результате появилась совместная работа [С. И. Пекар, В. И. Пипа и В. Н. Писковой, Письма в ЖЭТФ, т. 12, с. 338 (1970)]. Интересно, что при обсуждении результатов этой работы С. И. Пекар, исходя из своего опыта работ по конденсонам, ввел термин «мульти-конденсон». Мне и другим молодым сотрудникам не очень было понятно происхождение этого термина. Однако, спустя какое-то время, я увидел, что критерий Пипы В. И. имеет следующий физический смысл. В трехмерной решетке связанное конденсонное состояние отделено от зонных состояний электронов барьером, для преодоления которого электронная волновая функция должна быть локализована в сфере определенного радиуса, зависящего от силы электрон-фононного взаимодействия и эффективной массы электрона. Выражение для такого критического радиуса было получено в цитированной выше работе Пекара и Дейгена 1951 г. Оказалось, что критерий Пипы в точности совпадает с условием, при котором в многоэлектронной системе «конденсонные» сфе-

ры различных электронов начинают перекрываться. Стало понятно, что в цитированной работе, фактически речь шла о фазовом переходе многоэлектронной системы (предположительно переход в неоднородное состояние с волной зарядовой плотности). Отмечу, что попытка найти и описать в рамках исходной модели новую фазу, возникающую в результате фазового перехода, не увенчалась успехом. Однако, работа и новая физика произвели на меня сильное впечатление и стали триггером для цикла работ с моим участием по электронным фазовым переходам в электрон-фононных системах с деформационным взаимодействием. Одним из результатов, полученных в этом направлении, является построение теории деформационных фазовых переходов в квантующих магнитных полях. Мне и Соколову В. Н. удалось показать, в таких условиях не только существенно смягчается критерий возникновения фазовых переходов, но и удастся найти новые фазовые состояния системы – равновесные периодические структуры с пространственной модуляцией заряда и деформации решетки [В. А. Кочелап, В. Н. Соколов, Письма в ЖЭТФ, т. 25, с. 22 (1977)]. Далее, имея определенный опыт по исследованию многодолинных полупроводников, удалось понять, что в таких полупроводниках при деформационном взаимодействии с решеткой в условиях больших концентраций могут возникать фазовые переходы иного свойства: спонтанное возникновение пространственно однородной анизотропной деформации решетки, сопровождающееся энергетическим сдвигом электронных долин и междолинным перераспределением носителей (аналог эффекта Яна-Теллера известного для молекул). Кристалл спонтанно становится анизотропным и такое состояние энергетически выгодно. Важно, что в случае таких фазовых переходов удалось построить конечные состояния системы. Это исследование было выполнено совместно с Пипой В. Й., Писковым В. Н. и Соколовым В. Н. [В.А. Кочелап, В.И. Пипа, В.Н. Писковой, В.Н. Соколов, ЖЭТФ, 61, 2504 (1971)]. Были также рассмотрены и другие многоэлектронные системы с деформационным взаимодействием, испытующие фазовые превращения. Работы по деформационным фазовым переходам послужили основой кандидатской диссертации Соколова В. Н. (1976 г.). Впоследствии развитая теория была использована для описания фазовых переходов в узкозонных многодолинных полупроводниках группы A_4B_6 (SnTe, GeTe, PbTe). Обобщение этих работ и анализ экспериментов был дан в монографии Кочелап В.А., Соколов В.Н., Венгалис Б.Ю. «Фазовые переходы в полупроводниках с деформационным электрон-фононным взаимодействием», Киев: Наукова Думка

(1984). Хочу заметить, что по времени проведенные в теор.отделе работы по фазовым переходам хорошо вписывались в фундаментальные исследования систем с сильными взаимодействиями, активно проводимые с середины 60-х годов: переходы Мотта метал-диэлектрик [см. N. F. Mott, Z. Zinamon, Repts. Progr. Phys., v. 33, p. 881 (1970)], образование экситонного диэлектрика [Л. В. Келдыш, Ю. В. Копаев, ФТТ, т. 6, с. 2791 (1964)], вигнеровская кристаллизация электронов над гелием [см. В. С. Эдельман, УФН, т. 130, с. 675 (1980)], возникновение гетерогенных состояний в металлических системах [М. А. Кривоглаз, Письма в ЖЭТФ, т. 24, с. 403 (1976)], образование электрон-дырочной жидкости в полупроводниках и др. В настоящее время эта область продолжает развиваться, она больше известна, как наука о сильно-коррелированных электронных системах.

Продолжением исследований коллективных явлений в неравновесных условиях явилось предсказание нового типа оптической бистабильности в полупроводниках безрезонаторной и диссипативной природы. В общем случае термин оптическая бистабильность обозначает существование двух состояний системы (материала), под действием света (как правило, лазерного излучения). Было известно, что, если оптически нелинейную среду поместить в резонатор, то в поле сильного когерентного излучения такая система будет обладать двумя состояниями с различными величинами пропускания (отражения) света. Такое явление называется оптической резонаторной бистабильностью. Известно, что поглощение света в полупроводнике вблизи края фундаментального поглощения существенно зависит от концентрации носителей тока. При больших концентрациях взаимодействие носителей между собой приводит к перенормировке ширины запрещенной зоны и сдвигу края поглощения в сторону меньших оптических частот. Мы показали, что если для света малой интенсивности с частотой слегка ниже края фундаментального поглощения полупроводник практически прозрачен, то при достаточно большой интенсивности света возможно существование второго состояния, в котором свет порождает электронно-дырочные пары, которые, участвуя в перенормировке ширины запрещенной зоны, стационарно поддерживают такое «поглощающее» состояние полупроводника. Для существования явления не требуется когерентность света. Разработанная теория безрезонаторной диссипативной оптической бистабильности показала, что в образце формируются пространственно неоднородные состояния с доменами большого поглощения. В более общих терминах пространственное сосуществование двух не-

равновесных состояний соответствует образованию диссипативных структур. Я доложил работу на теор. семинаре. Пекар С. И. одобрил работу, однако заметил, что условия наблюдения явления достаточно сложны для эксперимента. Замечание сильно охладило меня и законченная работа провалялась в столе около двух лет. Опубликована она была лишь в 1981 г. [ФТП]. Спустя два года появились две немецкие публикации [], где для конкретного кристалла CdS высокого качества были представлены эксперимент и теория безрезонаторной бистабильности. В дальнейшем, мы продолжали развивать это направление с моим постоянным соавтором Соколовым В. Н. и аспирантом Кузнецовым А. В., в частности, учли детальную структуру края поглощения и изучили возможность управления бистальностью с помощью электрических полей (токов) [V. A. Kochelap, V. N. Sokolov, Phys. Stat. Solidi (b), v.146, p.311 (1988), V. A. Kochelap, A. V. Kuznetsov, Phys. Rev. B, v. 42, p. (1990)]. Спустя время, мы вернулись к проблеме бистабильности, изучая электро-оптическое поглощение в гетероструктурах. Мы построили теорию диссипативных структур, возникающих в электрически смещенных квантовых ямах при поглощении света [L. L. Bonilla, V. A. Kochelap, C. A. Velasco, J. Phys. C, Condensed Matter, v. 10, L539 (1998), J. Quantum and Semiclassical Optics, v. 1, p. 53, (1998)].

Пример образования диссипативных структур другого рода – при квантовом транспорте - был изучен совместно с В. В. Митиным и моим аспирантом Борисом Главиним. В конце 80-х экспериментально было открыто новое чисто квантовое явление в гетероструктурах с планарными барьерами – резонансное туннелирование. Суть его заключается в следующем. Обычно, в системах с барьерами электрический ток определяется квантовомеханическим туннелированием через барьеры и надбарьерным прохождением носителей. В гетероструктурах с двумя и более планарными барьерами возникает квазисвязанное электронное состояние, локализованное преимущественно между барьерами. Если энергия туннелирующего электрона близка к энергии квазисвязанного состояния, вероятность прохождения барьерной системы резко возрастает. При электрическом смещении гетероструктуры с планарными барьерами (диода) положение квазисвязанного состояния контролируется напряжением. Электрический ток резко возрастает, когда энергия инжектируемых электронов резонансно близка к энергии квазисвязанного состояния, и резко падает, когда квазисвязанное состояние опускается ниже дна зоны проводимости инжектирующего электрода. В результате резонансно-туннельный диод демон-

стрирует участок падающей вольт-амперной характеристики (отрицательное дифференциальное сопротивление). В условиях внешнего резонатора резонансно-туннельный диод может генерировать электрические колебания вплоть до частот порядка 1 ТГц. Последнее сделало эффект резонансного туннелирования на многие годы одним из самых замечательных явлений в квантовых гетероструктурах. Мы обратили внимание на то, что туннелирование через квазисвязанное состояние соответствует встраиванию заряда между барьерами, что ведет к бистабильности туннелирования: при одном и том же напряжении возможен как большой так и малый токи (малый и большой встроенные заряды). В планарном диоде эти две возможности токопереноса могут сосуществовать – спонтанно появляются поперечные к току пространственно неоднородные структуры, характеризующиеся большим и малым туннелированием. Мы построили теорию образования таких своеобразных структур [B. A. Glavin, V. A. Kochelap, V. V. Mitin. Patterns in bistable resonant tunneling structures. Phys. Rev. B 56, 13346 (1997)]. Особое внимание этому эффекту уделено потому, что вместе с упомянутым выше образованием неоднородных структур в электрически смещенных квантовых ямах при поглощении света, эти два явления являются единственными известными мне примерами спонтанного образования диссипативных структур в системах с существенно квантовым характером движения носителей.

Вернемся к исследованиям по теории электронного переноса в полупроводниках, которые всегда занимали одно из центральных мест в работе теор. отдела. Ранее это были, в основном, исследования средних (усредненных по ансамблю) характеристик электронов. На самом деле, с научной и практической точки зрения важными, а иногда определяющими, являются также флуктуации – отклонения от средних значений параметров. В середине 80-х отдел посетили знаменитая профессор Каролин Ван Флит (C. Van Vleet, Канада/США) и профессор Л. Реджиани (L. Regiani, Италия), оба являются самыми серьезными зарубежными экспертами по теории электронных флуктуаций. Митин В. В. начал сотрудничество с ними в области флуктуаций. На семинарах отдела стали докладываться обзоры и работы по новой тематике. Основное внимание уделялось изучению флуктуаций в существенно неравновесных условиях, например, флуктуаций горячих электронов и т. п. Методически работы по теории электронных флуктуаций являются даже более сложными, чем исследования по теории переноса. Одним из характерных и более или менее очевидных результатов является

рост интенсивности флуктуаций в неравновесных условиях. Типичным является увеличение амплитуды флуктуаций («шумов») электрического тока с ростом самого тока. Ввиду использования больших электрических смещений в полупроводниковых приборах, что является очевидной тенденцией современной электроники, роль флуктуаций возрастает и влияние электрических шумов на приборные характеристики часто становится определяющей. Меня заинтересовал вопрос – существуют ли такие физические ситуации, для которых шумы в полупроводниках и структурах будут ограничены или даже подавлены при больших электрических смещениях, т.е. в условиях, далеких от равновесия. Оказалось, что такие ситуации существуют. Одна из них соответствует, упомянутому выше «охлаждению» носителей тока в сильных полях. Оказалось, что электрические шумы подавляются с ростом электрического поля в определенном интервале полей. Соответствующая теория была разработана вместе с Митиным В. В. и Захленюком Н. А. [N. A. Zakhleniuk, V. A. Kochelap, V. V. Mitin. Nonequilibrium fluctuations in semiconductors under energy scattering of carriers on optical-lattice vibrations. Sov.Phys. JETP, 68, 863 (1989)]. Следующей идеей было проанализировать шумы в условиях размерного эффекта на длине остывания, упомянутого выше в связи с работами Грибникова З. С. и Мельникова В. И.. Было найдено, что и в этом случае шумы горячих электронов существенно ограничены [N. A. Zakhleniuk, V. A. Kochelap, V. N. Sokolov, Suppression of the hot electron fluctuations in semiconductors under conditions of the size effect, Letters to JETP, 55, 233 (1992); Limitation and Suppression of hot electron fluctuations in submicrometer semiconductor structures, Phys. Rev. B 48, 2304 (1993)]. Внимательно рассматривая эти явления, мы поняли, что на самом деле не происходит подавления всех флуктуаций. Вместо этого происходит перераспределение флуктуаций по частотам со значительным уменьшением их интенсивности на относительно низкочастотном (до 10 -100 Гц) крыле распределения. Если это так, то можно было ожидать ограничения или подавления относительно низкочастотных электрических шумов в условиях других размерных эффектов. Была разработана теория, демонстрирующая подавление шумов при размерных эффектах на длине свободного пробега [O. M. Bulashenko, V. A. Kochelap, O. V. Kochelap, Size effect on current fluctuations in thin metal films: Monte Carlo approach. Phys. Rev. B 45, 14308 (1992)] и на длине междолинного рассеяния [V. A. Kochelap, V. N. Sokolov, Size effects in fluctuation spectra of many-valley semiconductors. Phys. Rev. B 57, 15465 (1998)]. В другом цикле работ по шумам использовался эффект

кулоновского отталкивания носителей. Рассматривались баллистические проводники, т.е. короткие образцы, в которых перенос электронов осуществляется без каких-либо столкновений. В этих «безстолкновительных условиях» электрическое сопротивление связано с возникновением области объемного заряда и потенциального барьера, препятствующего инжекции электронов из катода. Флуктуации и шумы тока являются минимальными и обусловлены случайным характером инжекции электронов, т.е. статистикой (Пуассоновской) носителей в контакте (остаточный или «дробовой шум»). Было замечено, что случайный «избыточный» электрон, влетая в образец, увеличивает потенциальный барьер и препятствует инжекции последующих электронов, тем самым, подавляя отклонение тока от его среднего значения. В конце 90-х, когда стало возможным изготавливать образцы и приборы с короткими проводящими каналами, суб-Пуассоновские шумы изучались очень интенсивно. В наших работах была разработана наиболее детальная теория для невырожденных носителей [О. М. Bulashenko, M. Rubi, V. A. Kochelap. Self-consistent theory of shot noise in nondegenerate conductors, Phys. Rev. B 61, 5511 (2000)]. Идею подавления флуктуаций за счет кулоновского отталкивания мы использовали также, чтобы определить условия, при которых возможно подавление «обычного» поверхностного шума, возникающего в любых метал-окисел-полупроводник структурах [V. A. Kochelap, V. N. Sokolov, O. M. Bulashenko and J. M. Rubi, Coulomb suppression of surface noise, Appl. Phys. Lett. 78, 2003 (2001)]. Отметим, что помимо качественно важных результатов по подавлению флуктуаций, был достигнут важный методический результат: во всех упомянутых случаях были найдены точные решения флуктуационных уравнений для нелинейных режимов электронного переноса.

Следующий цикл работ, в котором я принимал участие, хорошо иллюстрирует преемственность в тематике теор. отдела. Действительно, как уже упоминалось, в середине 60-х годов Пекар С. И. начал исследования по усилению звука и акустоэлектронике. Был выполнен большой объем исследований в этой области. Я не принимал непосредственного участия в этих работах, однако, хорошо знал результаты, поскольку они докладывались на семинарах отдела. В 90-х годах, при исследовании электрон-фононного взаимодействия в квантовых ямах стало понятно, что существует не только локализация электронов в квантовых ямах, но и локализация (конфаймент) вблизи квантовых ям акустических колебаний, распространяющихся вдоль слоев гетероструктуры с ямами. Причем, чем выше частота акусти-

ческих колебаний, тем лучше они локализованы. Возникла идея использовать электронный и фононный конфамент для получения эффекта усиления сверхвысокочастотных акустических волн (с ультракороткими длинами волн) при электронном дрейфе. Была разработана соответствующая теория, которая предсказывала усиление акустических волн с частотами до 100-200 ГГц [S. M. Komirenko, K. W. Kim, A. A. Demidenko, V. A. Kochelap, M. A. Stroscio, Generation and amplification of sub-THz coherent acoustic phonons under the drift of two-dimensional electrons, Phys. Rev. B 62, 7459 (2000); Gerencov generation of high-frequency confined acoustic phonons in quantum wells, Appl. Phys. Lett., 76, 1869 (2000)]. Результаты были применены к гетероструктурам на основе соединений 3-5 и Si-Ge. Следующий цикл работ по электрон-фононному взаимодействию был посвящен усилению оптических фононов электронным дрейфом – проблеме, которая принципиально была сформулирована в еще 60-х годах. Тогда на вопрос можно ли усиливать оптические колебания электронным дрейфом был дан отрицательный ответ, поскольку два необходимых условия - большие дрейфовые скорости и большие концентрации носителей – не могли быть удовлетворены одновременно в объемных образцах. Мы показали, что наноструктуры – квантовые ямы и короткие диоды, напротив, позволяют реализовать оба необходимых условия [S. M. Komirenko, K. W. Kim, V. A. Kochelap, I. Fedorov, M. A. Stroscio, Coherent optical phonon generation by the electric current in quantum wells, Appl. Phys. Lett. 77, 4178 (2000); Generation of coherent optical phonon under the drift of two-dimensional electrons, Phys. Rev. B 63, 165308 (2001)]. Эксперименты, проведенные на коротких p-n-p структурах в Арканзасе, США, подтвердили эффект генерации оптических фононов [W. Liang, K.T. Tsen, O. F. Sankey, S.M. Komirenko, K.W. Kim, V.A. Kochelap, Meng-Chyi Wu, Chong-Long Ho, Wen-Jeng Ho, H. Morkoc, Observation of optical phonon instability induced by drifting electrons in semiconductor nanostructures, Appl. Phys. Lett., 82, 1968 (2003); Subpicosecond Raman studies of electric-field-induced optical phonon instability in an InGaAs-based semiconductor nanostructure, J. Phys.: Condens. Matter., 18, 7961 (2006)]. Это были первые успешные эксперименты в этой области. В дальнейшем мы пришли к выводу, что в наноразмерных образцах, где обратное время пролета электронов порядка частоты оптических фононов, возбуждение когерентных оптических колебаний и связанных колебаний электронов и оптических фононов могут существенным образом определять сверхвысокочастотные свойства образцов и, в частности, приводить к электрической неустойчивости в области частот порядка 10 ТГц

[V. A. Kochelap, A. A. Klimov, K. W. Kim, Optical phonon instability induced by high-speed electron transport in nanoscale semiconductor structures, Phys. Rev. B 73, 035301 (2006)].

Дальнейшие исследования электрон-фононного взаимодействия в гетероструктурах привели к разработке нового направления – наноакустики, области акустических колебаний с длинами волн порядка десятка нанометров (суб-терагерцовый и терагерцовый частотный диапазон). В принципе, некогерентные нанометровые колебания можно генерировать с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, путем создания потока тепловых акустических фононов [H.J. Maris, «Picosecond ultrasonics,» Sci. Am. 278, 86-89 (1998)]. Вместе с Б. А. Главиным и Т. Л. Линник мы предложили генерировать ТГц акустические фононы электрическим током в сверхрешетке, составленной из слабосвязанных квантовых ям. В таких системах, по крайней мере при низких температурах, электронный перенос преимущественно осуществляется за счет последовательных прыжков электронов из ямы в яму с испусканием фононов. Мы показали, что для акустических фононов, распространяющихся вдоль оси сверхрешетки и имеющих энергию, соответствующую падению электрического напряжения на одном периоде сверхрешетки, индуцированные процессы с испусканием доминируют над процессами поглощения. Т.е. возникает усиление соответствующих фононов. Процесс полностью аналогичен лазеру: формируется инверсная заселенность электронных состояний в ближайших квантовых ямах [B. A. Glavin, V. A. Kochelap, T. L. Lynnyk, Generation of high frequency acoustic phonons in narrow-miniband superlattice, Appl. Phys. Lett., 74, 3525 (1999)].

Physics News in 2006

A Supplement to APS News

Edited by Phil Schewe, Ben Stein and Ernie Tretkoff

Introduction

Physics News in 2006, a summary of physics highlights for the past year, was compiled from items appearing in AIP's weekly newsletter *Physics News Update*, written by Phil Schewe and Ben Stein. The items in this supplement were compiled by Ernie Tretkoff of the American Physical Society. The items below are in no particular order. Because of limited space in this supplement, some physics fields and certain contributions to particular research areas might be underrepresented in this compendium. These items mostly appear as they did during the year, and the events reported therein may in some cases have been overtaken by newer results and newer publications which might not be reflected in the reporting. Readers can get a fuller account of the year's achievements by going to the *Physics News Update* website at <http://www.aip.org/physnews/update> and APS's *Physical Review Focus* website at <http://focus.aps.org/>.

A New Kind of Acoustic Laser

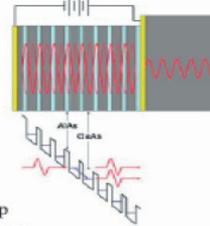
Sound amplification by stimulated emission of radiation, or SASER, is the acoustic analog of a laser. Instead of a feedback-built potent wave of electromagnetic radiation, a saser would deliver a potent ultrasound wave.

The concept has been around for years and several labs have implemented models with differing features. In a new version, undertaken by scientists from the University of Nottingham in the U.K. and the Lashkarev Institute of Semiconductor Physics in Ukraine, the gain medium—that is, the medium where the amplification takes place—consists of stacks (or a superlattice) of thin layers of semiconductors which together form “quantum wells.”

In these wells, really just carefully confined planar regions, electrons can be excited by parcels of ultrasound, which typically possess millielectronvolts of energy, equivalent to a frequency of 0.1-1 terahertz. Just as coherent light can build up in a laser by the concerted, stimulated emission of light from a lot of atoms, so in a saser coherent sound can build up by the concerted emission of phonons from a lot of quantum wells in the superlattice.

In lasers the light buildup is maintained by a reflective optical cavity. In the U.K.-Ukraine saser, the acoustic buildup is maintained by an artful spacing of the lattice layer thicknesses in such a way that the layers act as an acoustic mirror.

Eventually the sound wave emerges from the device at a narrow angular range, as do laser pulses. The monoenergetic nature of the acoustic emission, however, has not yet been fully probed. The researchers believe their saser is the first to reach the terahertz frequency range while using also modest electrical power input. Terahertz acoustical devices might be used in modulating light waves in optoelectronic devices. (Kent et al., *Phys. Rev. Lett.* 96, 215504, 2006)



Сообщение в новостях Американского Физического Общества об акустическом аналоге лазера – сазаре, разработанном в Ноттингемском Университете (Великобритания) и Институте физики полупроводников (Украина).

Мы показали, что этот эффект может быть использован для генерации когерентных акустических колебаний терагерцового диапазона, определили сужение спектра генерируемых фононов, оценили мощностные характеристики, изучили другие параметры генерируемых когерентных колебаний [B. A. Glavin, V. A. Kochelap, T. L. Linnik, K. W. Kim and M. A. Stroscio, Generation of high-frequency coherent acoustic phonons in superlattices under hopping transport. I. Linear theory of phonon instability, *Phys.Rev. B* 65, 086303

(2002); Generation

Еще одно научное направление, в котором я принимал участие, относится к физике усиления, генерации и взаимодействия терагерцовых электромагнитных колебаний. Терагерцовая область спектра электромагнитных колебаний лежит между радиочастотным и оптическим диапазонами. Она достаточно слабо изучена, хотя чрезвычайно интересна с практической точки зрения. Вместе с моим давним соавтором В. Н. Соколовым и аспирантом В. В. Коротеевым мы начали заниматься терагерцовыми колебаниями с конца 90-х годов. Использовали новые возможности, которые появились с развитием технологии наноструктур и новых материалов, в частности нитридов группы 3. Были исследованы наноразмерные диоды и сверхвысокочастотная кинетика электронов в квантовых ямах. Была обоснована возможность Гановской генерации в ТГц диапазоне [V. N. Sokolov, K. W. Kim, V. A. Kochelap and P. M. Muntiiian, Negative small-signal impedence of nanoscale GaN diodes in the terahertz frequency regime, Appl. Phys. Lett., 90, 142117 (2007)] и ТГц генерация при стриминге двумерных электронов [V. V. Korotyeyev and V. A. Kochelap, K. W. Kim, D. L. Woolard, Streaming distribution of two-dimensional electrons in III-N heterostructures for electrically pumped terahertz generation. Appl. Phys. Lett., 82, 2643 (2003); Tunable THz-frequency resonances and negative dynamic conductivity of two-dimensional electrons in group-III nitrides. Journ. Appl. Phys., 96, 6488 (2004)]. В настоящее время это направление продолжает активно развиваться.

Заканчивая описание работ, в которых я был вовлечен, замечу, что оправданием столь длинного изложения служат во-первых, длительный (45-летний!) обзорный период и во-вторых, участие в этих работах большого числа сотрудников отдела.

Одним из ключевых сотрудников теоретического отдела в течении многих лет является Виктор Иосифович Пипа. Научные интересы его широки: они включают электростатику и электродинамику диэлектриков, полупроводников, полупроводниковых структур и приборов, электрон-фононное взаимодействие, оптику полупроводников и многое другое. В. И. Пипа является прямым учеником академика Пекара С. И., однако, с самого начала он работал и публиковался в значительной степени самостоятельно. В 80-х годах их научные интересы сошлись и ими был выполнен фундаментальный цикл работ по сложной проблеме дополнительных граничных условий для света в кристаллах [С. И. Пекар, В. И. Пипа, Отражение экситонов

от поверхности кристаллов и дополнительные граничные условия в теории добавочных световых волн, ФТТ, 24, 1708 (1982); S.I. Pekar, V.I. Pipa, The «missing» electromagnetic wave and additional boundary conditions for light in a crystal, Solid State Commun., 46, 363 (1983)]. С. И. Пекар высоко ценил Виктора Иосифовича за его вдумчивость и глубокое проникновение в физическую сущность исследуемых явлений.

Выше уже упоминалось, о том, что Пипа В. Й. стал зачинателем нового направления в теории электрон-фононного взаимодействия в многоэлектронной системе - концентрационно-деформационной неустойчивости кристаллов. Другой фундаментальный результат в области электрон-фононного взаимодействия получен Пипой В. Й. при исследовании электронов в квантовых ямах. Был установлен новый механизм взаимодействия низкоразмерных носителей с акустическими фононами обусловленный вариацией эффективной массы носителя при деформации решетки [Pipa V.I., Vagidov N.Z., Mitin V.V., Glavin B. A., Electron-acoustic phonon interaction in semiconductor nanostructures: role of deformation variation of electron, Phys. Rev. B 64, 235322 (2001)]

Пипа В. Й. развил два направления в теоретической оптике полупроводников. Первое направление связано с теорией явления отрицательной люминесценции. Явление возникает, когда концентрации неравновесных электронов и дырок меньше их равновесных значений. В таких условиях интенсивность межзонного рекомбинационного излучения становится меньше интенсивности теплового излучения в том же спектральном диапазоне. Основные характеристики отрицательной люминесценции полупроводников при биполярном истощении в условиях магнитоконцентрационного эффекта были впервые описаны количественно в работах Пипы В. Й. [С.С. Болгов В.К. Малютенко, В.И. Пипа, «Отрицательная» люминесценция в полупроводниках, Письма в ЖТФ, 5, 1444 (1979); Люминесценция полупроводников в условиях дефицита носителей заряда, ФТП, 17, 208 (1983).]. Была исследована зависимость интенсивности отрицательной люминесценции от управляющих полей, определено ее предельное значение, температурная зависимость эффекта и пр. Важно, что эти работы выполнялись в тесном сотрудничестве с экспериментальной лабораторией ИФП, руководимой проф. Малютенко В. К.

Второе направление в оптике, развитое Пипой В. Й., относится к такой классической области физики как тепловое излучение. Пипа В. Й. исследовал спектральные, угловые и поляризационные характеристики тепло-

вого излучения полупрозрачных плоскопараллельных полупроводниковых слоев и показал, что благодаря резонаторному эффекту широкий спектр теплового излучения преобразуется в спектр, состоящий из острых пиков, а в диаграмме направленности возникают узкие лепестки [O.G. Kollyukh, A.I. Liptuga, V. Morozhenko and V.I. Pipa. Thermal radiation of plane-parallel semitransparent layers, Opt. Commun., 225, 349 (2003); Effect of the optical characteristics of semiconductor resonator structures on the amplitudes of their thermal radiation lines, Opt. Commun., 260, 607, (2006)]. Фактически показано, что тепловое излучение имеет структуру, определяемую геометрией и размерами излучателя. В иностранной литературе для описания этих явлений введен термин – когерентное тепловое излучение. Пипа В. Й. является признанным авторитетом в области «когерентного» теплового излучения. Обсуждаемые исследования проводились в тесном контакте с экспериментальной группой ИФП, они составляют физическую основу создания тепловых источников излучения с хорошо выраженными когерентными свойствами. Очевидно, что проблема «когерентного» теплового излучения находится в самом начале изучения, можно предположить, что в этой области нас ожидают новые фундаментальные результаты и важные приложения, например, в области энергосбережения.

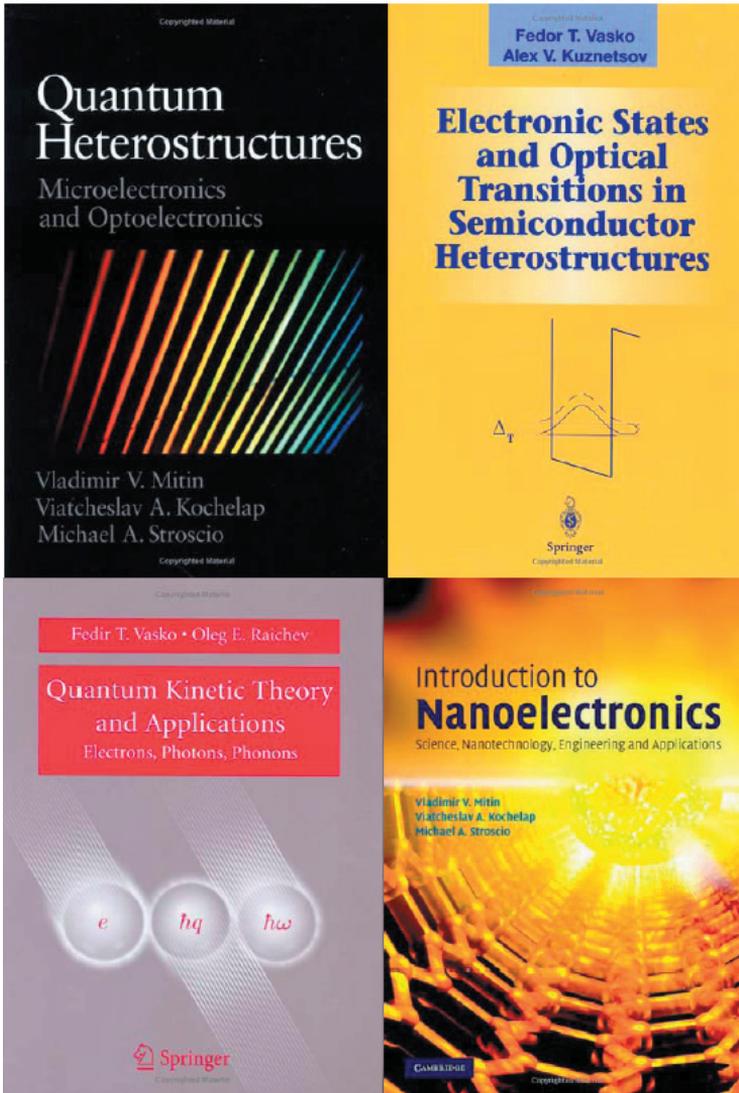
К важным результатам Пипы В. И. нужно также отнести развитую им теорию электротопографического эффекта [А.Е. Кравцов, В.И. Пипа, М.А. Резников, М.В. Фок, Электротопографический эффект в фотоэмульсиях и его применения, Тр. ФИАН СССР, 129, 13 (1981)]. Суть эффекта состоит в изменении пространственной структуры электрического поля при внесении в него диэлектрических включений с последующей фиксацией изменений поля с помощью фотоэмульсий. На этой основе были разработаны приборы для электро-фотографии, которые затем были использованы в космосе для фиксации деградации поверхностей космических кораблей под действием потоков частиц. Соответствующий цикл работ был отмечен Государственной Премией Украины по науке и технике.

Одним из ведущих (в полном смысле этого слова) сотрудников теоретического отдела в течении многих лет является профессор Федор Трофимович Васько. Он появился во втором теоретическом отделе в конце 60-х годов. Формально считался учеником профессора Дыкмана И. М. На самом деле, Васько Ф. Т. с самого начала был совершенно самостоятельным, со своим характерным подходом к исследованиям. Он освоил практически все известные исследовательские методики классической и квантовой ки-

нетики и успешно их применяет. Васько Ф. Т. активно публикуется в лучших физических журналах и издал три книги, две из которых опубликованы в издательстве Шпрингер: F.T. Vasko, A.V. Kuznetsov, «Electron states and optical transitions in semiconductor heterostructures», Springer, 1998; F.T. Vasko, O. E. Raichev, «Quantum Kinetic Theory and Applications: Electrons, Photons, Phonons», Springer, New York, 2005. За результаты, полученные по теории твердого тела, Васько Ф. Т. удостоен премии НАН Украины имени академика С. И. Пекара (2001 г.). Васько Ф. Т. имеет широкие научные контакты (США, Ирландия, Япония, Швеция – не полный список стран, с которыми он ведет активное научное сотрудничество).

Трудно перечислить результаты Ф. Т. Васько. Приведу лишь некоторые из них. В 70х - 90х годах он провел детальные исследования оптических свойств неравновесных носителей в полупроводниках. В частности, были проведены расчеты увлечения света дрейфом электронов [Л.А. Алмазов, Ф.Т. Васько, И.М. Дыкман, Влияние дрейфа носителей на распространение электромагнитных волн в твердотельной плазме, Письма в ЖЭТФ, 16, 305 (1972); Phys. Stat. Sol. (b), 48, 503 (1971)], а также электрооптически модуляции, обусловленной разогревом и дрейфом носителей. Для случая фотон-фононного резонанса совместно с Грибниковым З. С. были изучены оптические свойства неравновесных носителей, возбуждаемых при внутри- или междузонных переходах за счет накачки ИК- или оптическим лазером [Ф.Т. Васько, Грибников З.С., Квазиэнергетическое распределение электронов, взаимодействующих с оптическими фононами в электрическом поле излучения, Письма в ЖЭТФ, 21, 629 (1975); Энергетическое распределение электронов, взаимодействующих с бездисперсионными фононами и излучением, ЖЭТФ, 89, 1343 (1985)]. Проведены также расчеты (в комплексе с измерениями) усиления нелинейной рефракции вблизи края фундаментального поглощения в полупроводниках A2B6 [А. А. Борщ, О. М. Бурин, Ф.Т. Васько, В. Я. Гайворонский, Анизотропия нелинейной рефракции полупроводников A2B6 в области края фундаментального поглощения, Письма в ЖЭТФ, 52, 703 (1990)], а также рассеяния ИК излучения за счет междузонных переходов дырок в одноосно-деформированном p-Ge [E. V. Bakhanova, F. T. Vasko, Infrared Raman scattering in uniaxially compressed semiconductors, Sol. State Communs. 76, 981 (1990); A.V.Gaydar, V.N.Poroshin, O.G.Sarbey F.T. Vasko Infrared light scattering by free holes in p-Ge Semicond. Sci. and Technol., 9, 1790 (1994)].

Выше уже упоминалось, что Васько Ф. Т. одним из первых изучил спи-



Книги, посвященные квантовым гетероструктурам и нанозлектронике, опубликованные сотрудниками теоретического отдела за последние годы в ведущих научных издательствах Cambridge University Press и Springer.

новое расщепление энергетического спектра двумерных электронов в несимметричных квантовых ямах или инверсионных слоях, а также развил теорию ориентации спинов электрическим током [Ф.Т. Васько, Н.А. Прима, Спиновое расщепление спектра двумерных электронов, ФТТ, 21, 1734 (1979)]. Последнее явление было недавно обнаруженное при изучении спиновых токов. В последующих работах этого цикла изучены особенности релаксации спина, спин-зависящие туннелирование и оптические переходы, а также возникновение латеральной нецентроинверсии энергетическо-

го спектра в продольном магнитном поле и пр.

Явления переноса, оптические свойства гетероструктур, включая туннельно-связанные структуры, отклик в терагерцевом спектральном диапазоне и другие, изученные Ф. Т. Васько явления, стимулировали проведение многочисленных экспериментов, среди них изучение диссипативного режима туннелирования, вибрационного механизма электрон-фононного взаимодействия (совместно с Пипой В. Й.), генерации разностной гармоник в смещенной сверхрешетке и пр. В последние годы проф. Ф. Т. Васько подключился к изучению графена (бесщелевого полуролводника с линейным энергетическим спектром носителей заряда). В этой области он первым изучил квазиклассический транспорт и оптические свойства неравновесных носителей [O. G. Balev, F. T. Vasko, and V. Ryzhii, Carrier heating in intrinsic graphene by a strong dc electric field, Phys. Rev. B, 79, 165432 (2009); P.Romanets, F.Vasko, M.Strikha, Phys.Rev.B, 79, 033406 (2009)]. Профессор Васько Ф. Т. имеет много учеников и коллег в отделе и институте, с которыми поддерживает научные контакты и публикуется.

Ведущий научный сотрудник, д. ф.-м. Стриха Максим Витальевич является одним из постоянных соавторов Васько. Сам М. В. Стриха воспитан на традициях двух ведущих научных школ – школы академика С. И. Пекара, в отделе которого он работал с первых шагов научной карьеры, и школы Ленинградского Физико-технического института, где он закончил аспирантуру у профессора Ясиевич И. Н. Эти факторы, повидимому, определили два момента, характерных для исследовательского стиля Стрихи М. В. С одной стороны он владеет многими базовыми теор. физическими методиками и хорошим математическим анализом (на этой почве и развивается многолетнее соавторство Стриха-Васько). С другой стороны, ему интересны конкретные материалы и экспериментальные результаты (что характерно в большей степени для Питерской школы). Не могу не отметить, что М. В. Стриха обладает чрезвычайно глубокими знаниями в гуманитарной сфере. С годами у него укрепилась потребность участия в общественной и политической жизни страны. Именно поэтому он принял предложение работать в Министерстве Образования и Науки Украины в должности заместителя министра, отвечающего за науку. Понимая проблемы, стоящие перед наукой в целом, за небольшой промежуток времени М. В. Стрихе удалось провести ряд важных мероприятий, стимулирующих научные исследования.

Возвращаясь к научным результатам М. В. Стрихи, отмечу многолетний цикл работ, посвященных узкозонным и безщелевым полупроводникам. Было показано, в частности, что перестройка зонного спектра по действием давления существенно понижает темп безизлучательной Оже рекомбинации. Это открывает возможности повышения на порядок квантового выхода излучения и использования узкозонных кристаллов не только в ИК фотодетекторах, но и ИК эмиттерах [С.Г.Гасан-заде, М.В.Стриха, Г.А.Шепельський. УФЖ. Огляди. 5, 3 (2009)]. Вместе с группой Г. А. Шепельского для безщелевых материалов было обосновано и экспериментально наблюдалось вынужденное излучение ТГц диапазона с перестраиваемой частотой [Ф.Т.Васько, С.Г.Гасан-заде, М.В.Стриха, Г.А.Шепельський, Письма ЖЭТФ, 50, 287 (1989); Е.Ф.Венгер С.Г.Гасан-заде, М.В.Стриха, С.В.Старый, Г.А.Шепельський, ФТП 34, 791 (2000)].

Большой цикл работ выполнен Стрихой М. В. по потенциалам нулевого радиуса. В частности, модель потенциала нулевого радиуса была обобщена на случай несимметричных глубоких центров, актуальным примером которых является изоэлектронная примесь азота в 3-5 полупроводниковых соединениях [Ф.Т.Васько, М.В.Стриха, ЖЭТФ 133, 8033 (2008)]. В последнее время, М. В. Стриха исследует такой актуальный материал как графен (см. ссылки выше).

С большим уважением я хочу отметить исследования одного из молодых и самых активных сотрудников отдела – д.ф.-м.н. Райчева Олега Эдуардовича. Райчев О. Э. является учеником профессора Грибникова З. С. Он активно владеет фактически всеми теор. физическими методиками и внес очень большой вклад в написание упомянутой выше книги по квантовой кинетике.

Среди конкретных научных результатов Райчева О. Э., отмечу теорию электронного транспорта в структурах, с гетеропереходами между полупроводниками с различным расположением энергетических долин, как это имеет место в практически важных системах контактов GaAs (нижняя Г долина) с AlAs (нижняя X долина). Выяснен характер и механизмы переноса через такие гетеропереходы [З.С. Грибников, О.Э. Райчев, ФТП 23, 2171 (1989); Райчев, ФТП, 24, 1772 (1990); О.Е. Raichev, Phys. Rev. B 49, 5448 (1994)], получены нелинейные вольт-амперные характеристики N-типа при продольном транспорте в слоистых GaAs/AlAs структурах [З.С. Грибников, О.Э. Райчев, ФТП 24, 346 (1990)], особенности проводимости сверхрешеток GaAs/AlAs [О.Э. Райчев, ФТП 25, 1228 (1991)], обусловленные переносом

электронов между GaAs та AlAs. Также предложен новый тип транзистора, который использует принцип управления туннельным током Γ -электронов через слой AlAs за счет изменения плотности состояний X-электронов [З.С. Грибников, О.Э. Райчев, ФТП 25, 859 (1991)].

Вместе с Васько Ф. Т., Райчев О. Э. установил, что за счет перемешивания квантово-механических состояний легких и тяжелых дырок в гетеро структурах с проводимостью р-типа существенные особенности имеет туннельная амплитуда, которая, в частности, зависит от латерального импульса и может обращаться в ноль при определенных значениях последнего. На основе этой теории была рассчитана релаксация неравновесных носителей и ток через сверхрешетки [Ф.Т. Васько, О.Э. Райчев, ЖЭТФ 104, 3103 (1993); О.Е. Raichev, Phys.Rev. B 50, 5382 (1994)].

Проведен широкий цикл исследований электронных свойств двойных квантовых ям (туннельно-связанных двумерных электронных систем), в частности, изучались 1) туннельный ток между двумерными слоями (в том числе в магнитном поле) [F.T. Vasko, O.E. Raichev, Phys. Rev. B 50, 12195 (1994); O.E. Raichev, F.T. Vasko, Phys. Rev. B 50, 12199 (1994); Ф.Т. Васько, О.Э. Райчев, ЖЭТФ 108, 2103 (1995); O.E. Raichev, F.T. Vasko, J. Phys.: Condens. Matter 8, 1041 (1996); O.E. Raichev, F.T. Vasko. J. Phys.: Condens. Matter 9, 1547 (1997)]; 2) динамика носителей при сверхбыстром оптическом возбуждении [F.T. Vasko, O.E. Raichev, Phys. Rev. B 51, 16965 (1995); O.E. Raichev, Phys. Rev. B 51, 17713 (1995); O.E. Raichev, F.T. Vasko, A. Hernandez-Cabrera, P. Aceituno, H. Cruz, J. Appl. Phys. 80, 5106 (1996); O.E. Raichev, F.T. Vasko, A. Hernandez-Cabrera, P. Aceituno, Phys. Rev. B 56, 4802 (1997); O.E. Raichev, J. Appl. Phys. 80, 924 (1996); S.R. Andrews, P.G. Huggard, C.J. Shaw, J.A. Cluff, O.E. Raichev, and R. Grey, Phys. Rev. B 57, R9443 (1998)]; 3) проводимость в магнитных полях различной ориентации [F.T. Vasko, O.E. Raichev, Phys. Rev. B 52, 16349 (1995); O.E. Raichev, F.T. Vasko, Phys. Rev. B 53, 1522 (1996); O.E. Raichev, F.T. Vasko, Phys. Rev. B 55, 2321 (1997); O.E. Raichev, F.T. Vasko, Phys. Rev. B 57, 12350 (1998)]. Эти исследования позволили объяснить количественно имеющиеся экспериментальные результаты и стимулировать дальнейшие измерения.

Райчев О. Э. разработал теорию влияния спин-орбитального взаимодействия на транспортные характеристики двумерных электронов, в частности, проанализировал спиновый полевой транзистор [O.E. Raichev, P. Debray, Phys. Rev. B 65, 085319 (2002)], построил общую теорию спиновой поляризации индуцированной электрическим током (так называемый спин-Холл эффект) [O.E. Raichev, Phys. Rev. B 75, 205340 (2007); O.E. Raichev, Phys.

Rev. B 75, 233303 (2007); O.E. Raichev, Phys. Rev. Lett. 99, 236804 (2007)]. Эти результаты имеют важное значение для развития спинтроники. Они получили высокую оценку научной общественности, в частности, работы этого цикла отмечены премией С.И. Пекара (2009).

Последние работы Райчева О. Э. посвящены магнето-осцилляционным явлениям в многослойных гетеро структурах. Работы отличаются самым тщательным теоретическим анализом. Они выполнены в тесном взаимодействии с экспериментальными группами Университета Сан-Пауло (Бразилия) и Национальной лабораторией высоких магнитных полей в Гренобле (Франция) [S. Wiedmann, G. M. Gusev, O. E. Raichev, A. K. Bakarov, J. C. Portal, Phys. Rev. B, 80, 035317 (2009); N. C. Mamani, G. M. Gusev, E. C. F. da Silva, O. E. Raichev, A. A. Quivy, A. K. Bakarov, Phys. Rev. B, 80, 085304 (2009); N. C. Mamani, G. M. Gusev, O. E. Raichev, T. E. Lamas, A. K. Bakarov, Phys. Rev. B 80, 075308 (2009); O. E. Raichev, Phys. Rev. B, 80, 075318 (2009); S. Wiedmann, N. C. Mamani, G. M. Gusev, O. E. Raichev, A. K. Bakarov, J. C. Portal, Phys. Rev. B, 80, 245306 (2009)].

Помимо исследований по теории твердого тела, полупроводников и полупроводниковых приборов, в отделе ведутся работы общетеоретического характера. Так ведущий научный сотрудник Соскин С. М. разрабатывает теорию случайных явлений в нелинейных модельных системах. Соскиным С. М. с соавторами, в частности, с М.И. Дыкманом, идентифицирован и исследован новый класс флуктуационных, колебательных и хаотических явлений, получивших название «нуль-дисперсионные» явления. Если зависимость частоты колебаний одномерного нелинейного осциллятора от их энергии имеет экстремум, то вблизи экстремальной энергии частота колебаний почти не зависит от энергии, т.к. в экстремуме дисперсия частоты равна нулю. В возмущённых нуль-дисперсионных осцилляторах возникают характерные явления, отсутствующие в обычных системах: нуль-дисперсионные пики в спектрах флуктуаций, шумо-индуцированное сужение спектра, нуль-дисперсионный стохастический резонанс, нуль-дисперсионный нелинейный резонанс [Soskin S. M., Phys. Rev. Lett. 76, 4453 (1996); Phys. Rep. 373, 247 (2003)]. Соскин С. М. впервые исследовал шумо-индуцированный выброс из потенциальной ямы на коротких временах (совместно с В.И. Шекой и Т.Л. Линник) [Phys. Rev. Lett. 84, 2556 (2000); Phys. Rev. Lett. 86, 1665 (2001); Phys. Lett. A 353, 281 (2006)]. В частности, было открыто явление ступенчатого нарастания со временем шумо-индуцированного потока через ба-

рьер [Phys. Rev. Lett. 86, 1665 (2001)]. В последние годы Соскиным С. М. был получен ряд важных результатов по так называемому «сепаратрисному хаосу» [Phys. Rev. Lett. 90, 174101 (2003); Phys. Rev. Lett. 95, 224101 (2005)]. Также разработан новый подход к описанию сепаратрисного хаоса, решена задача находящаяся на стыке физики и математики задачу о максимальной ширине сепаратрисного хаотического слоя [Phys. Rev. , E 80, 066212 (2009)] и др.

Вместо заключения.

Изложенные факты, идеи и результаты не охватывают, конечно, всего, что было сделано в отделе теоретической физики за 50 лет. Я надеюсь, однако, что можно увидеть преемственность в традициях и тематике отдела, заложенных его основателями Пекаром С. И., Толпыго К. Б. и Рашбой Э.И. Мне представляется, что даже далеко не полный перечень результатов свидетельствует о том, что работы отдела вносят достойный вклад в современное развитие теории и физики полупроводников, полупроводниковых структур и приборов. Участие в исследованиях новых поколений талантливых и преданных науке исследователей позволяет надеяться, что отдел теоретической физики будет по-прежнему активен в исследованиях по самым новейшим направлениям физики и ее приложений.



Заведующий отделом теоретической физики ИФП НАН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор Кочелап В. А.