

# Ипановские теоретики

Е.Л. Ивченко

“There are only two ways to live your life. One is as though nothing is a miracle. The other is as though everything is a miracle”.      Albert Einstein

## I. Глазами студента и аспиранта

Закончив школу в 1964 году, я поступил на факультет радиоэлектроники Ленинградского политехнического института, кафедра физики полупроводников. Что такое полупроводники, я понимал очень смутно. Читал, что это очень современный перспективный материал, что академик Иоффе – отец советской физики и, в частности, физики полупроводников. О том, что в Ленинграде существует Институт полупроводников АН СССР, или кратко ИПАН, я еще не знал.

На пятом курсе начал тревожиться, что не нахожу дороги к физику-теоретику, у которого я мог бы “попросить задачу”, а проще говоря, начать преддипломную практику. Опуская подробности, скажу главное: в конце концов меня познакомили с теоретиками Григорием Евгеньевичем Пикусом и Аркадием Гиршевичем Ароновым, работавшими в ИПАН’е в доме 10 на набережной Кутузова (особняк Е. П. Пашковой – французское посольство, рядом с Литейным мостом). Там же я увидел Андрея Ивановича Ансельма, заведующего лабораторией теоретической физики, или, по-простому, теоротделом ИПАН’а. До этого я сиживал в свободной аудитории Политехнического института и захлеб читал книгу Ансельма “Введение в теорию полупроводников”. Почему-то больше всего мне понравился параграф “Колебания кристаллической решетки. Фононы”. Это было первое издание 1969 года. И в первом, и во втором издании автор выражает благодарность Г.Е. Пикусу за многочисленные советы и замечания. Помню, много позже, когда мы что-то обсуждали с Пикусом, входит Андрей Иванович и обращается к Пикусу с просьбой посмотреть рукопись второго издания (1978 г.). До знакомства с Гэ-Е (так мы с Ароновым кратко называли Григория Евгеньевича) я уже читал в библиотеке Политехнического института его книгу “Основы теории полупроводниковых приборов”. Как мне потом рассказывал ГЕ, написать эту книгу уговорил его Абрам Федорович Иоффе. В 1972 году вышла вторая книга Г.Е. Пикуса, написанная совместно с Геннадием Левиковичем Биром, под названием “Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках”. В предисловии авторы

поблагодарили Д.К. Фаддеева, Э.И. Рашба и автора этих строк за полезные замечания.

Дипломную и кандидатскую работы я делал под руководством А.Г. Аронова. Постепенно мне стало ясно, что в теоротделе имеются три центра притяжения, олицетворяемые яркими физиками Г.Е. Пикусом, Вадимом Львовичем Гуревичем и Юрием Александровичем Фирсовым. В сектор Пикуса входили Г.Л. Бир, А.Г. Аронов, Эдуард Сонин и я, сначала студент, потом аспирант. Под знаменем В.Л. Гуревича стояли Борис Лайхтман (по кличке “Йог”), Сергей Ганцевич, Ромас Катилус, Виктор Каган, Юрий Гальперин, Вениамин Козуб. Третья группа находилась под идейным влиянием Ю.А. Фирсова. В нее входили Валерий Брыксин, Лев Коровин, Ирина Ланг, Станислав Павлов, Евгений Кудинов. В 1961 году Гуревич и Фирсов (ЖЭТФ 40, 489, 1961) и Михаил Израилевич Клиninger (ФТТ 3, 1342, 1961) предсказали магнитофонный резонанс, т.е. резонансное поглощение энергии при переходах между уровнями Ландау с участием оптических фононов. Работа приобрела оглушительный успех после наблюдения эффекта в ряде полупроводниковых материалов в лаборатории С.С. Шалыта в ИПАН и за рубежом. Притягательность Гуревича и Фирсова была связана не только с их бесспорной харизмой, но и с тем, что фортуна к ним благосклонна. Григорий Евгеньевич был старше их, фронтовик, награжден орденами и медалями, он стал широко известен в СССР и за рубежом своими фундаментальными работами по развитию теоретико-групповых методов в физике твердого тела.

На должность завлаба А.И. Ансельм перешел из Физтеха в ИПАН в 1955 г. Чтобы сосредоточить свои усилия на создании теоретического отдела, он даже отказался от поста заведующего кафедрой теоретической физики Ленинградского политехнического института, моей альма-матер. Из Физтеха с Андреем Ивановичем перешли только два теоретика – Татьяна Абрамовна Конторова и Юрий Николаевич Образцов, поэтому перед Ансельмом стояла задача – подобрать людей (как он шутя говорил “по знакомству”) и создать в ИПАН школу по теории полупроводников. К сожалению, Татьяну Абрамовну я не запомнил, но с ее работами впоследствии познакомился и в 1988 даже сослался в одной из статей на модель Френкеля–Конторовой, предложенную ими в 30-ые годы. А вот Юрия Николаевича помню хорошо. Запомнилось, как он с восторгом говорит о великом творении Гете “Фауст”, которого он читал в подлиннике, и как отмечает, что первая часть намного сильнее второй.

А.И. Ансельм со своими аспирантами Б.М. Аксеровым и Р.Г. Тарханяном развивали в ИПАН теорию термомагнитных явлений в полупроводниках в квантующих магнитных полях. В их теории возникали трудности принципиального характера. Именно Ю.Н. Образцов спас положение, предложив добавить к объемному току поверхностные диамагнит-

ные токи, текущие по граням образца. Андрей Иванович неоднократно вспоминал это при мне, выражая глубокое уважение к таланту Образцова. Мне рассказывали, что Образцов никак не хотел писать кандидатскую диссертацию. Наконец, усилиями ближайших коллег и частично администрации его заставили это сделать, а на защите совет проголосовал за присуждение ему докторской степени. Тогда это было возможно.

С группой Бориса Мойжеса, включающей Юрия Равича и Валерия Кудинова, лично общаться не приходилось. Большую роль в моих исследованиях халькогенидов свинца сыграла книга Ю.И. Равича, Б.А. Ефимовой, И.А. Смирнова “Методы исследования структуры полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS”. Юрий Равич работал в Институте полупроводников в 1959–1965 гг., а затем – во ВНИИ источников тока, ФТИ и СПбГТУ (теперь Политехнический университет Петра Великого).

С Михаилом Израилевичем Клингером я много общался во время конференции в Сухуми в конце 70-ых годов. Советский и израильский физик-теоретик, он работал в разные годы в Черновцах, Киеве, Свердловске, Тель-Авиве, а также как приглашенный профессор в ФРГ, Дании, Италии, Швейцарии, Бельгии, Великобритании. С 1956 по 1991 годы М.И. Клингер был сотрудником ИПАН и Физтеха (после объединения в 1971 году). В ИПАН’е он разрабатывал теорию кинетических явлений при малой подвижности носителей тока в упорядоченных и неупорядоченных твердых телах.

Анатолий Григорьевич Самойлович в 1956–1962 гг. заведовал лабораторией электронных явлений в полупроводниках, его университетский учебник “Термодинамика и статистическая физика” выдержал два издания (1953 и 1955 гг.).

Некоторые физики-теоретики числились в экспериментальных лабораториях. Так, теоретики Лев Коренблит и Владимир Косарев входили в состав лаборатории С.С. Шалыта (Владимир Валентинович также написал главу в эту книгу). Сергей Ктиторов в момент присоединения ИПАН к ФТИ являлся сотрудником лаборатории Стильбанса. В аспирантуре мне было трудно определить статус остальных теоретиков ИПАН. По воспоминаниям ипановцев, с которыми я связывался по электронной почте, Владимир Оскотский, Федор Бакшт, Владимир Фикс, Геннадий Недлин и Виктор Львов также числились в отделе Ансельма. Недавно по телефону Геннадий Маркович (США) сообщил, что после защиты диссертации Андрей Иванович взял его в теоротдел при условии, что он будет в контакте с лабораторией Г.А. Смоленского. Возможно, в таком же положении был Львов, который, как и Недлин, работал в области магнетизма. В 1987 году В.С. Львов, работая в Новосибирске, издал замечательную книгу “Нелинейные спиновые волны”, которую рецен-

зировал В.Е. Захаров, тогда член-корреспондент АН СССР, теперь академик РАН. При приеме меня в аспирантуру ИПАН было также поставлено условие, чтобы я сотрудничал с лабораторией В.К. Субашиева. С Ваганом Каспаровичем и Александром Данишевским мы опубликовали несколько совместных статей по нелинейному поглощению света в полупроводниковых кристаллах.

Сегодня уже не так важно, кто числился в теоретическом отделе, а кто был теоретиком в экспериментальной лаборатории. Владимир Борисович Фикс занимался физикой диффузионных процессов, публиковался обособленно, он автор книги “Ионная проводимость в металлах и полупроводниках (электроперенос)” (Наука, М., 1969). Федор Григорьевич Бакшт сотрудничал с экспериментаторами лаборатории Юрьева, а позже, уже в ФТИ, даже возглавил эту лабораторию.

## II. Вклад ипановцев в теорию твердого тела

В 1998 г. мы писали с Владимиром Иделевичем Перелем главу “Теория полупроводников” для юбилейного сборника “Ioffe Institute. Development and Research Activities”, посвященного 80-летию Физтеха. Понимая, что даже простое упоминание названий публикаций займет много страниц, мы решили сосредоточиться на главных результатах, которые сыграли, с нашей точки зрения, важнейшую роль в развитии теории полупроводников. Этой линии я придерживаюсь и здесь, но пишу только о достижениях ипановских теоретиков до объединения институтов.

О классических работах А.И. Ансельма с соавторами я уже написал в первой части статьи. Там же упомянут **магнитофононный резонанс**. Он является первым известным эффектом внутреннего резонанса, когда в роли возмущения выступают внутренние колебания в твердом теле, в данном случае, оптические фононы (подробнее см. обзор “Магнитофононный резонанс в полупроводниках”, УФН, 1974). Название явление получило с подачи В.Л. Гуревича и Ю.А. Фирсова. В более поздние годы в статьях на русском языке стали писать также “магнетофононный резонанс”.

Другим примером внутризонного резонанса служит **электрофононный резонанс**, предсказанный Брыксыным и Фирсовым (1971). В материале с узкими разрешенными зонами в умеренно сильном электрическом поле формируется штарковская лестница двумерных электронных состояний. В направлении поля волновая функция электрона локализована и транспорт представляет собой квантовые прыжки с одной ступени на другую с участием фонона. Переход принимает резонансный характер, если энергия оптического

фонона становится кратной энергетическому расстоянию между штарковскими уровнями. Эффект обнаружен как в объемных кристаллах, так и в искусственных сверхструктурах на основе периодической цепочки квантовых ям и цеолитах.

Существуют кристаллические материалы, в которых даже при высоких температурах подвижность носителей тока растет с температурой, следуя активационному закону. Это означает, что в некоторых совершенных кристаллах возможен прыжковый перенос носителей заряда между узлами решетки. Такое возможно при сильной связи носителей с колебаниями решетки (фононами): носитель оказывается “одетым” в фононную “шубу” и формирует **поляронное** состояние. Возникла настоятельная необходимость в описании такого транспорта по кристаллической решетке в  $r$ -пространстве, а не в  $k$ -пространстве, как это делается при решении кинетического уравнения Больцмана. Эта программа была успешно реализована коллективом из четырех авторов: В.В. Брыксина, Е.К. Кудинова, И.Г. Ланг и Ю.А. Фирсова. Теория описывает прыжковое движение носителей в узкой поляронной зоне. Эффект Холла в этом случае контролируется магнитным потоком через замкнутые траектории, образованные прямыми и обратными цепочками поляронных дискретных переходов между узлами решетки. Было изучено также оптическое поглощение, что позволило при анализе данных по TiO впервые сделать заключение о существовании поляронов малого радиуса.

Поглощение звука стало также второй важной областью сотрудничества В. Гуревича и Ю. Фирсова. В 1961 они опубликовали, совместно с великолепным физтеховским теоретиком и блестящим лектором Валерием Скобовым, работу по **гигантским квантовым осцилляциям** коэффициента поглощения звука как функции магнитного поля. Экспериментальное изучение таких осцилляций стало источником информации о структуре поверхности Ферми металлов.

Бир и Пикус виртуозно владели инструментами теории симметрии при анализе физических явлений. Конечно, это в первую очередь **метод инвариантов**, его осваивать я начал с первых лет общения с ними. Он основан на твердом фундаменте теории групп и теории представлений групп, и, тем не менее, его применение кажется непосвященным своего рода шаманством или искусством. Биру и Пикусу принадлежит целый ряд результатов, несомненно полученных на основе метода инвариантов. Широко известна выведенная ими формула для деформационного вклада в гамильтониан Латтинжера, описывающий электронный спектр в валентной зоне полупроводников с решеткой алмаза или цинковой обманки. Обозначения введенных ими констант деформационного потенциала  $a$ ,  $b$  и  $d$  приняты и используются в оригинальных статьях, монографиях и учебных пособиях.

Метод инвариантов применен также при расчете дисперсии дырок в валентной зоне теллура в совместной работе с экспериментаторами лаборатории Шалыта. Этот элементарный полупроводник до сих пор привлекает внимание исследователей своими необычными свойствами. Развитая Биром и Пикусом теория обменного взаимодействия электрона и дырки служит отправной точкой для исследования тонкой структуры экситонных уровней в объемных полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах.

**Об Аронове в момент моего прихода в ИПАН.** Помню рассказ А.Г. Аронова о том, как он познакомился с Г.Е. Пикусом. Аркадий пришел в ИПАН с поставленной им самим и решенной задачей о поведении электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Пикус посмотрел и одобрил. Первую статью Аронов опубликовал в 1963 году без соавторов, в 1966 в ЖЭТФ появилась статья Аронова и Пикуса про эффект Франца–Келдыша и магнитооптический эффект в скрещенных полях, а в 1968 г. они докладывали в Москве на Международной конференции по физике полупроводников совместную работу по теории электрооптических эффектов. Я тогда уже начал работать с Аркадием и помню, в каком радостном возбуждении он вернулся из Москвы.

Я не был на Конференции в Москве, но по рассказам участников она запечатлелась в моей памяти как историческое событие в физике полупроводников. Там было много важного и интересного. Вадим Львович Гуревич представил приглашенный доклад “Нелинейная теория усиления ультразвука в пьезоэлектрических полупроводниках”. Статья по докладу в Трудах конференции занимает 14 страниц текста, формул и рисунков. Фактически это обзор цикла работ, выполненных тогда Гуревичем с Гальпериным, Ганцевичем, Каганом и Лайхтманом (в одной из работ участвовал физтеховец Алексей Эфрос) по развитию нелинейной теории поглощения, усиления и генерации ультразвуковых волн в полупроводниках и металлах при приложении электрического поля. Усиление происходит в условиях, когда скорость дрейфа электронов превышает скорость звука.

**Флуктуации в неравновесных условиях.** В равновесии многочастичная система (газ, жидкость, твердое тело) удовлетворяет соотношению Каллена–Вельтона, связывающему спектр флуктуаций с коэффициентом линейного отклика на внешнее возмущение. В неравновесных условиях, например, во внешнем электрическом поле или в условиях освещения, такая универсальная связь отсутствует. Этой проблемой занимались Ганцевич, Гуревич, Катилус. С моей легкой руки теорию этих трех авторов кратко окрестили теорией Гэ–Гэ–Ка. Для описания флуктуаций ими была создана специальная версия диаграммной техники Константинова–Переля. В статье 1969 г. ГГК показали, что в неравновесной стационарной системе с учетом электрон–электронных столкновений флуктуации

характеризуются особым видом корреляций. Независимо и другим методом замечательные московские теоретики Ш.М. Коган и А.Я. Шульман пришли к такому же результату. Евгений Михайлович Лифшиц настолько высоко оценил эти две работы, что они со Львом Петровичем Питаевским сослались на всех пятерых авторов в книге Физическая кинетика, параграф “Флуктуации функции распределения в электронном газе”.

Предтечей активного и плодотворного изучения спиновой релаксации в ФТИ в 70-ые годы стали работы С.Т. Павлова и Фирсова по теории **спиновой релаксации Эллиота–Яфета**. Я помню то усердие, с которым изучал их работы середины 60-ых годов по этой тематике.

После объединения институтов творческая активность ипановских теоретиков не угасла, но это уже история Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

### III. Вечный вопрос о случайности и закономерности

Недавно я шел отмечать день рождения Сергея Тарасенко и задумался о случайностях и совпадениях (Ландау шутливо определял “совпадение” как “падение сов”). Представьте такую сцену: два студента-приятеля приходят к нам сдавать теорминимум (мы в Секторе принимаем два экзамена: классическую механику и теорию поля). Приглашен Вениамин Козуб, чтобы, при благоприятном исходе, один студент пошел на практику к нам, а другой – в сектор Гуревича–Козуба. Оба успешно сдают экзамены, и мы предлагаем им выйти в коридор и определиться, кто куда пойдет, например, бросив монету. Монета направила Тарасенко в наш Сектор! Я подходил к Физтеху в назначенное время и вдруг осознал, что был вариант, при котором случайный бросок монеты не привел бы нынешнего член-корреспондента РАН С.А. Тарасенко к нам и мы бы не сделали с ним ряд замечательных работ. Да, подумал я, случайность действительно есть язык Бога. А другой студент долго в ФТИ не задержался и сейчас преуспевает в области компьютерных технологий.

А вот пример другого члена РАН явно опровергает роль случая в жизни физика-теоретика. Пойти к нам в Сектор и сдать теорминимум посоветовал Мише Глазову директор Физико-технической школы М.Г. Иванов. При наших случайных встречах Михаил Георгиевич недвусмысленно намекал, что, как научный руководитель, я обязан оправдать его ожидания относительно будущего Глазова. Спасибо ему, у нас с Михаилом Михайловичем Глазовым почти сразу все начало получаться, его звезда засияла и он стал член-корреспондентом РАН даже раньше, чем Тарасенко.

В заключение я благодарю М.М. Глазова, Л.Е. Голуба и С.А. Тарасенко, внимательно

прочитавших рукопись и сделавших ряд полезных замечаний. Спасибо большое ипановцам, которые помогли мне вспомнить многие обстоятельства того, что происходило более полувека назад.