

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПОЛУПРОВОДНИКАМ

(август 1958 г.)

По объему исследовательских работ физика твердого тела и, особенно, физика полупроводников и в СССР и за рубежом стоит непосредственно за ядерной физикой. Международные конференции по полупроводникам привлекают внимание ученых всего мира.

В качестве члена делегации АН СССР, автору пришлось участвовать в последней из таких конференций, происходившей в августе 1958 г. в Рочестере (США). Следует отметить теплый и дружественный прием, который встретила делегация АН СССР со стороны организационного комитета Конференции, в который входили виднейшие физики США, в том числе нобелевские лауреаты У. Брэттен, Дж. Бардин и В. Шокли.

Конференция происходила «в городке» Рочестерского Университета, расположенном в парке, вдали от торговой части города, что чрезвычайно способствовало неофициальным обсуждениям, часто проходившим под открытым небом. Имеет смысл привести несколько цифр, характеризующих ее масштабы: число официальных участников — 500; количество обсуждавшихся докладов: 132 на 19 секциях и 5 итоговых докладов на специальном заключительном заседании. Труды Конференции, изданные в январском номере международного журнала «Физика и химия твердого тела»*), составили том в 550 страниц.

После краткого вступительного слова Дж. Бардина, слово для доклада на пленарной сессии было предоставлено акад. А. Ф. Иоффе. Доклад А. Ф. Иоффе был посвящен теоретическому анализу и обзору результатов исследования электрических и тепловых свойств полупроводников, полученных за последние годы в Институте полупроводников АН СССР. Отметив успехи, достигнутые в исследовании и использовании узкого класса полупроводников — валентных кристаллов, А. Ф. Иоффе показал, что электрические свойства большинства полупроводниковых материалов не укладываются в рамки общепринятой зонной теории. Движение электронов в этих веществах не может быть описано модулированной плоской волной, так как эта волна затухает на очень малом расстоянии, иногда на расстоянии меньшем, чем постоянная решетки. В этом случае представление о волнообразном движении электрона должно быть заменено представлением о последовательных перескоках от одного атома к другому. Это представление подтверждается, в частности, экспоненциальным ростом подвижности с температурой (опыты В. П. Жузе).

А. Ф. Иоффе обратил внимание и на то, что перенос тепла в твердых телах не всегда может быть объяснен современной теорией теплопроводности. В ряде случаев основную роль должны играть: а) экситонная теплопроводность, б) теплопередача посредством излучения, в) «скачкообразная» (несинхронная) передача энергии от атома к атому, когда понятие фонона теряет обычный смысл. Работами советских физиков показано, что взаимодействие электронов с фононами, а также электронов и фононов с дефектами периодической структуры часто не соответствуют обычным представлениям.

Новые идеи и критика состояния основ теории твердого тела, высказанные А. Ф. Иоффе, были живо восприняты и обсуждались как сразу после доклада, так и в итоговой сессии американскими теоретиками Дж. Бардином, К. Херрином, Ванье и В. Шокли.

*) Труды Международной конф. 1958 г. по полупроводникам, *Physics and Chemistry of Solids*, 8, январь, 1958 г.

Доклад известного немецкого физика Х. Велькера и О. Фольберта (лаб. Сименс, ФРГ) был посвящен анализу характера связей в полупроводниковых интерметаллических соединениях типа A_3B_5 , представляющих громадный практический интерес для полупроводниковой техники. На основе многочисленных экспериментальных данных Велькер показал, что реальные связи в кристаллах этих веществ носят промежуточный характер между ковалентной и ионной, т. е. образованию ковалентной связи сопутствует поляризация оболочек, центр тяжести которых смещается к элементу V группы. Степень поляризации растет со средним атомным весом и ионной составляющей в связи. Чем большую роль играет ионная связь, тем больше ширина запрещенной зоны и меньше подвижность дырок. С другой стороны, подвижность электронов достигает максимальных значений, если в результате поляризации восстанавливается нейтральность обоих компонентов, что, вероятно, имеет место в антимониде индия $InSb$. Показано также, что для наибольшей растворимости соединений типа A_3B_5 друг в друге и элементов IV группы в этих соединениях необходимы близкие значения поляризуемости.

Следует заметить, что за последние годы лабораторией Велькера достигнуты прекрасные результаты в получении весьма чистых кристаллов интерметаллических соединений и исследовании и объяснении их электрических и оптических свойств. Некоторые из новых полупроводников, синтезированных в этой лаборатории, успешно применены для обнаружения ядерных излучений (InP) и преобразования солнечной энергии в электричество ($GaAs$).

На секции, посвященной вопросам теории, в докладе Слетера (Массачусетский технологический институт, США), проводилась мысль, что зонная теория по существу шире, чем чисто одноэлектронное приближение. Докладчик считает, что в тех случаях, когда можно пренебречь а) взаимодействием электронов и дырок и б) деформацией решетки свободными зарядами, зонная теория представляет собой достаточно хорошее приближение.

К числу интересных проблем, к решению которых можно подойти в ближайшее время, Слетер относит использование новых экспериментальных данных о спектрах колебаний простых кристаллических решеток для вычисления микроскопических констант упругости. Задача о теплопроводности и термическом расширении также, по мнению Слетера, может быть уточнена учетом взаимного рассеяния тепловых колебаний.

Доклад Зинера (лаб. Вестингауз, США) был посвящен анализу условий, при которых следует предпочитать зонную или «оболочечную» модель кристалла. В некоторых случаях они дают, по крайней мере качественно, одни и те же результаты и выбор произволен. В некоторых же случаях (например, соединения переходных металлов) результаты могут быть противоположными. Оболочечная модель дает более низкую потенциальную энергию электронов, зонная теория дает более низкую кинетическую энергию, причем выигрыш в энергии получается тем больше, чем шире зона, т. е. чем больше радиусы орбит и чем меньше межатомные расстояния. Поэтому в некоторых соединениях переходных металлов образуется d -зона и проводимость носит металлический характер, в других же зоны не образуются и, несмотря на незаполненную d -оболочку, соединение является полупроводником, причем подвижность носителей экспоненциально растет с температурой. Докладчик отметил, что это соответствует идеям А. Ф. Иоффе.

Люттигер (Мичиганский университет, США) в своем докладе проанализировал недостатки современных теорий переноса, основанных на решении уравнения Больцмана. Если первый член в решении Лоренца всегда более или менее правильно описывает изменение функции распределения под действием градиента обобщенного поля, то второй член—изменение функции распределения под действием столкновений (как и само понятие столкновения) верны лишь в определенных предельных случаях. Для этого необходимо, чтобы время между столкновениями было достаточно велико по сравнению с длительностью самого столкновения и, в то же время, длительность столкновения должна быть велика по сравнению с обратной частотой электронных волн. В общем случае необходим более общий подход, который бы дал стационарную матрицу плотности распределения зарядов (аналогично идеям, развиваемым Кубо и Самойловичем).

А. С. Стильбанс (Институт полупроводников АН СССР) на основе анализа экспериментальных данных о зависимости подвижности носителей от степени вырождения и температуры показал, что при рассеянии электронов на тепловых колебаниях решетки в области высоких температур основную роль играют двухфононные процессы. При рассеянии электронов на примесях формально вычисленное поперечное сечение для рассеяния оказывается сильно зависящим от температуры. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что импульс может быть передан примесному атому; благодаря этому в присутствии примесей с электронами могут взаимодействовать и коротковолновые фононы.

Большое число работ, обсужденных на Конференции, было связано с процессами генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводниках, опре-

деляющими действие полупроводниковых приборов и представляющими большой принципиальный интерес. Специальная сессия была посвящена результатам изучения захвата и рекомбинации носителей на примесных центрах.

В докладе Т а й л е р а (лаб. «Дженерал Электрик», США) «Примеси с глубокими уровнями энергии в германии» были критически разобраны современные данные. Тайлер указал, что для ряда примесей имеется простая связь между числом энергетических уровней и характером центра (донор или акцептор), с одной стороны, и электронной конфигурацией примесного атома, с другой. Была сделана попытка систематизировать данные о коэффициентах диффузии и растворимости ряда элементов в германии, а также данные о сечениях захвата для электронов и дырок. Подчеркивалась важная роль зарядного состояния центра и возможность его определения при помощи спинового резонанса.

Доклад М. Э к с а (лаб. Белл, США) «Гигантские ловушки» был посвящен попытке теоретического объяснения больших сечений захвата (10^{-15} — 10^{-13} см²), наблюдаемых у ряда примесей в германии и кремнии. Согласно расчетам докладчика такой порядок величины сечений можно получить, если предположить, что захват происходит на сильно возбужденные состояния центров, причем за захватом следует каскадный процесс перехода центра в низшие возбужденные состояния с испусканием каждый раз одного фонона. Заметим, что подобное представление о безизлучательных переходах было ранее высказано в СССР Э. Н. Адировичем.

В докладе П а н д с б е р г а и Б э т т и (Абердин, Англия) «Эффект Оже в полупроводниках» была вычислена скорость рекомбинации, соответствующая прямым междоузельным переходам электронов с передачей освобождающейся энергии одному из свободных электронов. Полученное теоретическое выражение для времени жизни сравнивалось с экспериментальными данными для сурьмянистого индия. Было найдено, что теоретическое время жизни имеет правильный порядок величины для собственного материала при 35° С, но при более низкой температуре согласия между теорией и экспериментом не имеется.

В докладе Б р и л л и Ш в а р ц (лаб. Филко, США) «Излучательная рекомбинация и время жизни электронов и дырок в германии» приведены экспериментальные данные об интенсивности инфракрасного излучения, возникающего в германии при процессах рекомбинации. Цель работы заключалась в экспериментальной проверке теоретической зависимости между интенсивностью рекомбинационного излучения и концентрацией избыточных носителей, теоретически предсказанной Рубреком и Шоули. Найдено, что экспериментальная зависимость согласуется с теоретической.

На той же секции был прочитан доклад С. Г. К а л а ш н и к о в а (Ин-т радиотехники АН СССР) «Исследование рекомбинации электронов и дырок в германии». Доклад содержал результаты последних работ, выполненных автором и его сотрудниками по исследованию зависимости времени жизни от концентрации равновесных носителей и температуры. В результате анализа полученных данных сделаны выводы о характере элементарных актов захвата и рекомбинации, играющих основную роль в германии.

Большой интерес вызвало сообщение Р. Х е й н с а (лаб. Белл, США) о тонкой структуре спектров инфракрасного рекомбинационного излучения в германии и кремнии. Используя приемник с очень большой чувствительностью (охлажденные PbS-фотосопротивления с малым уровнем шумов), Хейнс обнаружил тонкую структуру в спектрах рекомбинационного излучения в Ge и Si; согласно интерпретации автора «боковые» линии связаны с испусканием и поглощением фононов при электронном переходе; интересно отметить, что полученные Хейнсом спектры ирекрасно совпадают с данными, полученными Мак-Фарлейном, изучавшим тонкую структуру края полосы поглощения в германии. Мак-Фарлейн связывает существование структуры с существованием экситонов. Результаты Брокгауза, исследовавшего энергетический спектр вначале холодных нейтронов после рассеяния их кристаллами германия, по-видимому, подтверждают правильность интерпретации экспериментов Хейнса.

Б е н у а (Эколь Нормаль, Франция), изучавший рекомбинационное излучение в кристаллах германия с дислокациями, обнаружил новые особенности структуры спектра и дал предварительную интерпретацию его, связывая полосы излучения с дискретными энергиями связи электронов, захватываемых дислокациями.

Помимо этих докладов многие из сообщений на других секциях (например, на секции, посвященной дислокациям) также были тесно связаны с исследованным рекомбинации и локальных уровней.

Общий итог представленных работ, посвященных процессам рекомбинации, сводится к следующему:

а) характер локальных уровней (донор или акцептор), создаваемых примесными атомами в германии и кремнии, так же, как и число этих уровней, согласуются с электронной конфигурацией примесных атомов и могут быть предсказаны при учете тетраэдрического характера связей в решетке германия и кремния;

б) основными процессами рекомбинации в германии и кремнии являются, по-видимому, фононные (и, возможно, экситонные) процессы (передача освобождающейся при захвате энергии фононам);

в) имеющиеся данные о рекомбинации (величина сечений захвата для разных центров рекомбинации, их зависимость от температуры, различие между центрами рекомбинации и центрами прилипания и др.) недостаточны, и поэтому требуется дальнейшее интенсивное изучение явлений рекомбинации и захвата носителей в полупроводниках.

Основным вопросом, обсуждавшимся на секции, посвященной исследованию поверхности полупроводников, также были захват и рекомбинация носителей заряда, как известно, весьма важные в вопросах, связанных с практическим применением таких кристаллов, как германий и кремний. В обзорном докладе А. Мэни (лаб. Сильвания, США) были рассмотрены современные представления об энергетическом спектре поверхностных уровней «быстрых состояний» для германия и кремния; при этом докладчик подчеркнул, что физическая природа этих состояний до конца не выяснена. Доклады Барнса и Бэнбури (Университет Реддинг, Англия), а также Миссина (Университет Иллинойс, США) и Аллена (лаб. Белл, США) были посвящены результатам изучения весьма чистых поверхностей германия и кремния, получаемых при раскалывании кристаллов в высоком вакууме (около 10^{-10} мм рт. ст.) или в результате ионной бомбардировки.

В секции, посвященной дислокациям, оживленную дискуссию вызвало сообщение П. Барюш (Франция, Эколь Нормаль) о рекомбинационных центрах, возникающих при бомбардировке германия быстрыми электронами. Обсуждение экспериментальных данных, в котором принимал участие В. Шокли, касалось, в основном, применимости статистики рекомбинации к многозарядным центрам захвата. Результаты Барюша, а также данные группы Кроуфорда (Ок-Ридж, США), сообщенные нам авторами во время Конференции, заставляют считать, что исследование свойств нарушений, вызванных бомбардировкой частицами, продолжает быть задачей, далекой от полного разрешения. Группой Кроуфорда, занимающей действием нейтронного облучения на полупроводники, показано, что в кристаллах, подвергнутых облучению, имеют место сильные изменения значений подвижности, которые не удается объяснить возникновением многозарядных центров, связанных с нарушениями структуры. По-видимому, наряду с такими центрами, в облученных нейтронами кристаллах возникают крупные нарушения, состоящие из сотен или даже тысяч смещенных атомов. Работы Кроуфорда и др. подтверждают данные, полученные в 1957--1958 гг. в ФИАН, и содержат ряд новых результатов.

На секции, посвященной оптическим свойствам полупроводников, особенный интерес вызвала работа Г. Фэна и др. (Университет Индиана, США), посвященная исследованию тонкой структуры спектров поглощения неонизованными донорами и акцепторами в германии. В опытах, проводившихся при температуре жидкого гелия, было измерено поглощение, соответствующее фотоионизации и возбуждению примесных уровней доноров и акцепторов III и V групп в германии; изучавшиеся спектры лежат в очень далекой инфракрасной области, вплоть до 300 микрон. Полученные новые данные об энергиях ионизации и уровнях возбуждения примесных центров в германии, насколько нам известно, являются пока единственными. Кроме того, на секции обсуждалась теория инфракрасного поглощения электронами, находящимися в зоне проводимости (Мейер, лаб. Филипс, Голландия и Кесслер, Кельский университет, ФРГ). Г. Икунс и др. (США) сообщили о результатах систематического исследования характера связей в сложных полупроводниках на основании данных о спектрах поглощения на колебаниях решетки.

На заседании, посвященном теплопроводности полупроводников, в докладе Ясио Какаи (Япония) излагались результаты измерения теплопроводности теллуридов висмута и свинца в интервале температур от 100° до 600° К. Измерения проводились методом Ангстрема. В обоих случаях в области собственной проводимости была обнаружена дополнительная теплопроводность, обусловленная биполярной диффузией носителей; величина этой дополнительной теплопроводности хорошо согласуется с теорией Прайса. Подтверждения данных о существовании дополнительной теплопроводности в теллуристе свинце, наблюдавшейся в ШАН, получено не было. В опытах не учитывались потери тепла на излучение, что могло внести серьезную погрешность.

Крумхазл (США) рассмотрел механизмы теплопроводности, существующие для области низких и высоких температур. При низких температурах, для которых не существует энергии активации, возбужденные состояния должны описываться непрерывным спектром, непосредственно примыкающим к равновесному состоянию. К таким процессам относится перенос энергии фононами, свободными электронами и излучением (особенно в случае большой диэлектрической постоянной).

При высоких температурах существенную роль также могут играть механизмы, для которых необходима энергия активации (экситонный механизм и биполярная диффузия).

На секции полупроводниковых соединений Скандли (Военно-морское ведомство США) сообщил о результатах изучения края полосы поглощения в селениде, теллуриде, сульфиде свинца и сплавах этих соединений (путем измерения поглощения в монокристаллах с толщиной от 10^{-1} до 10^{-4} см); коэффициент поглощения измерялся,

таким образом, с области от 10 до 10^{-3} см⁻¹. Согласно теории, поглощение, связанное с прямыми переходами (без участия фононов), пропорционально квадратному корню из частоты (считая от границы поглощения), поглощение же, связанное с непрямыми переходами, пропорционально квадрату частоты. Используя эти зависимости, можно разделить поглощение, связанное с прямыми и непрямыми переходами, и получить данные о зонной структуре полупроводника. Скэнлон получил следующие данные о минимальной энергии, необходимой для электронных переходов:

	прямые переходы	непрямые переходы
PbS	0,41 эв	0,37 эв
PbSe	0,28 эв	0,26 эв
PbTe	0,32 эв	0,3 эв

Как видно из таблицы, для не прямых переходов энергетический зазор во всех случаях приблизительно на $k\theta$ меньше, чем для прямых (θ —температура Дебая), что объясняется простейшей зонной моделью (с одним минимумом). Из формы кривых поглощения Скэнлон вычислил время жизни носителей для излучательной рекомбинации, оказавшееся равным: для PbS—63 мксек, для PbSe—8 мксек и для PbTe—6 мксек. Измерение изменения сопротивления в магнитном поле указывает, что энергетические зоны представляют собой эллипсоиды, ориентированные в направлении $\langle 111 \rangle$.

Д р а б л («Дженерал Электрик», Англия) исследовал электропроводность, термоэдс, коэффициент Холла и изменение проводимости в магнитном поле в дюрочном и электронном теллуриде висмута в интервале температур от 77° до 300° К. Полученные данные интерпретировались им с точки зрения зонной модели, представляющей собой шесть эллипсоидов, расположенных в плоскостях отражения в k -пространстве.

Время релаксации предполагалось изотропным. Таким образом, удалось вычислить главные значения тензора эффективных масс для дырок и электронов, установить связь между коэффициентами Холла (для разных направлений магнитного поля) и числом носителей и найти значения подвижности дырок μ_p и электронов μ_n (при комнатной температуре $\mu_n=1250$ см²/сек, $\mu_p=600$ см²/сек).

На заседании, посвященном исследованию процессов, связанных с экситонами в полупроводниках, была доложена работа Е. Ф. Г р о с с а (Ленинградский физико-технический ин-тут АН СССР), исследовавшего оптические спектры поглощения, связанные с образованием экситонов, а также магнито-оптические свойства экситонов. В ходе дискуссии по этому докладу, вызвавшему большой интерес, А. П о р т и с (Калифорнийский университет, США) сообщил о новых экспериментальных данных, подтверждающих интерпретацию опытов Е. Ф. Гросса. Э. Г р и й о и М. Б а н с и Г р и й о (Франция) сообщили о результатах исследования излучения, связанного с аннигиляцией экситонов в чистых кристаллах сернистого кадмия.

Другие доклады на этой секции, в том числе работы Б р о з е р а (ФРГ) и Б а л к а н с к о г о (Эколь Нормаль, Франция) были посвящены диффузии экситонов и ее связи с фотопроводимостью.

Значительное внимание уделяется проблеме движения носителей заряда, имеющих значительную кинетическую энергию («горячие электроны»). В докладах Я. Т а у ц а (Физико-технический институт, Чехословакия) и В. С. В а в и л о в а (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР) было показано, что процесс фотоионизации в германии, кремнии и др. полупроводниках может сопровождаться генерацией добавочных пар носителей за счет кинетической энергии первичных фотоэлектронов. В обзорном докладе К е н и г а (Колумбийский университет, США) и работе Э. К о н в е л л (лаб. Сильвания, США) обсуждалась теоретическая постановка задачи о «горячих электронах», в частности, их рассеяние колебаниями кристаллической решетки.

К сожалению, объем настоящей заметки не позволяет упомянуть о многих из других работ, и мы вынуждены ограничиться перечислением тем остальных секционных заседаний конференции: полные кристаллы; магнито-оптические эффекты; полупроводники с широкой запрещенной полосой (главным образом вопросы, связанные с исследованием кристаллофосфоров); резонансные явления, т. е. исследование методом диамагнитного (циклотронного) резонанса и спинового электронного резонанса; гальваномагнитные явления.

На заключительном пленарном заседании в пяти «итоговых» выступлениях была сделана попытка критического разбора основных направлений в физике полупроводников.

Г. Б р у к с (Гарвардский университет, США) указал на то, что допущения зонной теории, сводимые к использованию одноэлектронного потенциала, пренебрежению мультиплетной структурой индивидуальных атомов и описанию взаимодействия электрона с решеткой как слабого возмущения, позволяют использовать ее для описания свойств широкой группы полупроводников, характеризующихся большой подвижностью носителей. В этом случае не выполняется лишь первое из допущений. С другой стороны, Брукс подчеркнул трудности, возникающие в связи с нарушением второго или второго и третьего допущений во многих случаях (например, для

оксидов металлов). Сославшись на данные, приводившиеся А. Ф. Поффе и Зинером, он отметил, что в настоящее время методы, позволяющие количественно описывать свойства полупроводников, к которым простая зонная теория неприменима, отсутствуют. Брукс считает большим успехом детальное теоретическое вычисление зонных структур таких кристаллов, как Ge, Si и InSb, «полуэмпирическим» способом с использованием экспериментальных величин, в особенности, данных, полученных методом циклотронного резонанса. В области отыскания новых веществ с ценными и интересными полупроводниковыми свойствами, по мнению Брукса, много дал «химический» подход, позволивший также качественно связать характер связей атомов в интерметаллических соединениях с такой типично полупроводниковой характеристикой, как подвижность носителей. Далее, докладчик рассмотрел имеющиеся данные о зонной структуре кристаллов, уровнях примесных центров и спектрах колебаний решетки.

Во втором итоговом докладе Польдера (лаб. Филлис, Голландия) были рассмотрены успехи в области теоретической интерпретации электронных переходов и экспериментальные данные о процессах с участием экситонов. В настоящее время не остается сомнений в том, что экситонные состояния существуют и в атомарных полупроводниках, таких, как Ge и Si, и в полупроводниковых соединениях. Польдер отметил успехи в теоретической интерпретации переходов с участием фононов, тонкой структуры экситонных спектров и влияние на них магнитного поля. Говоря об экспериментальных работах, он указывал на важное значение полученных Е. Ф. Гроссом данных о локализации экситонов (радиусах орбит экситонных состояний), а также работ Э. Буриштейна и др., исследовавших магнито-оптику прямых переходов в Ge и InSb. Коснувшись вопроса рекомбинации электронов и дырок, Польдер отметил теоретические результаты Ландсберга, рассмотревшего процесс ударной рекомбинации (явление Оже), и указал на близкую связь этого явления и обратного процесса ударной ионизации носителями, имеющими избыточную кинетическую энергию (экспериментальные данные Тауда и Вавилова).

Подробный разбор современных представлений о процессах рекомбинации был дан в итоговом докладе Л. А. Пекера (лаб. «Дженерал Электрик», США). Докладчик отметил близкую связь процессов ударной ионизации и рекомбинации и внешнего фотоэффекта с поверхности кристаллов полупроводников. Он указал на трудности, стоящие перед экспериментаторами, изучающими рекомбинацию, ускоряемую в большинстве случаев захватом носителей примесными центрами, играющими роль катализаторов. Анкер отметил успехи, достигнутые советскими физиками, в интерпретации сложного процесса захвата и рекомбинации носителей атомами меди в кристаллах германия (доклад С. Г. Калашникова), указав, что в этом случае выделяющаяся энергия рассеивается фононами, а процессы типа Оже и участие плазмы не играют существенной роли. К числу важных еще не разрешенных задач докладчик отнес исследование процессов захвата и рекомбинации на структурных дефектах и дислокациях, имеющие важное принципиальное и практическое значение. Коснувшись вопроса дальнейшего экспериментального изучения экситонных процессов, Анкер подчеркнул важность последних данных о линейчатых спектрах люминесценции CdS и ZnS, полученных в Ленинграде, Париже и Страсбурге.

Проф. У. Брэттен (лаб. США), являющийся автором ряда важнейших работ, посвященных исследованию поверхности полупроводников, подытожил новые результаты, относившиеся к этой области. Работы, обсужденные на Конференции, по мнению Брэттена, можно разделить на четыре категории: исследование «реальных» поверхностей таких кристаллов, как Ge и Si; вопрос о «чистых» поверхностях; движение электронов и дырок в поверхностных слоях и, наконец, химия адсорбции и структура поверхности. Брэттен считает, что в настоящее время физические свойства «реальной поверхности» германия ясны: на поверхности всегда имеется оксидный слой. Между этим слоем и полупроводником имеются центры, способные захватывать электрон или дырки, что приводит к возникновению пространственного заряда. Имеются довольно подробные данные о положении энергетических уровней этих центров захвата и их влиянии на скорость рекомбинации. На внешней поверхности или в оксидном слое расположены другие центры, с которыми связывают так называемые «медленные» состояния. При внезапном изменении потенциала поверхности для установления равновесия ее с объемом кристалла требуются секунды или даже минуты. По мнению Брэттена, существенные успехи в получении так называемых «чистых» поверхностей Ge и Si разными методами (раскалывание, ионная бомбардировка, прогресс) не дают еще оснований считать, что после очистки «химические» поверхностные слои отсутствуют. Брэттен выразил надежду, что в скором времени будут найдены эффективные методы исследования химии поверхности полупроводников, что позволит более полно толковать, предсказывать, а также и управлять физическими свойствами поверхности.

В последнем из итоговых выступлений проф. К. Херринг (лаб. Белл, США) дал обзор современного состояния теории электропроводности полупроводников, отметил успехи в решении задачи о функции распределения «горячих» электронов. Опыты с «горячими» электронами дают сведения о взаимодействии этих электронов с «оптическими» колебаниями кристаллической решетки. Говоря об исследовании рассеяния

носителей примесными центрами, Херринг подчеркнул важность исследования электропроводности кристаллов с высокой концентрацией примесей и указал в качестве интересного для теории примера на данные о подвижности носителей в вырожденных теллуристом свинце и теллуристом висмуте, полученные Стильбансом. В заключение Херринг подчеркнул неудовлетворительное состояние теории электропроводности полупроводников с малой подвижностью и необходимость работы в этом направлении.

2. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В США

За время пребывания в США в 1958 году и весной 1959 г., автор ознакомился с работой отделов «фундаментальных исследований» лабораторий Белл и Нью Джерси и Дженерал Электрик в Скенектеди. Обе эти лаборатории известны большим числом первоклассных работ по основным вопросам физики полупроводников, часто весьма далеким от немедленного практического использования.

Разумеется, за короткое время, имевшееся в нашем распоряжении, мы могли осмотреть лишь установки, представлявшие особый интерес в связи с нашей собственной работой, хотя и имели широкие возможности выбора. Ниже я попытаюсь коротко рассказать о наших впечатлениях об оборудовании, условиях и темпах научной работы и ее организации.

Работа по получению наиболее совершенных кристаллов кремния и германия, которую можно было бы отнести к области металлургии, до настоящего времени ведется в обеих физических лабораториях. Интересно отметить, что уже с 1956 г. было выяснено, что использование кварцевых тиглей для выращивания монокристаллов кремния не позволяет приблизиться к собственной проводимости и получить большие времена жизни носителей заряда вследствие диффузии примесей из кварца. Наиболее чистые кристаллы удается получить методом бестигельной зоны плавки. Удельное сопротивление наилучших кристаллов, полученных в лаборатории Белл, доходит до 12 000 *ом·см* («собственный» кремний должен иметь сопротивление около 250 000 *ом·см*). Время жизни носителей заряда иногда превышает 1000 *мксек*. Возможности детального изучения и теоретической интерпретации основных свойств кремния и германия лабораториями Белл и Дженерал Электрик, в первую очередь, были обусловлены именно быстрым развитием техники очистки и выращивания кристаллов.

Доктором Дэш в последней лаборатории недавно были впервые получены кристаллы полупроводников Ge и Si, практически не содержащие дислокаций. По методу Дэша, кристаллы выращиваются вытягиванием из расплава, находящегося не в тигле, а на кремниевой или германиевой подставке. При условии, что затравка имеет малые поперечные размеры (0,2 *мм*), не содержит дислокаций и вырезана параллельно оси (111) или (100), удается получить монокристаллы без дислокаций диаметром до 15 *мм*. Совершенные кристаллы германия, по словам сотрудников лабораторий Дженерал Электрик, обладают совершенно исключительной механической прочностью при высоких температурах. Для обнаружения дислокаций в объеме кристалла помимо обычного метода счета ямок травления на поверхности широко используется «проявление» дислокаций высаживающимися на них атомами меди, легко диффундирующей в кремний, и наблюдение их с помощью инфракрасного микроскопа (при $\lambda > 1,2 \mu$ кремний прозрачен) и электронно-оптического преобразователя.

Большое внимание уделяется синтезу «высокотемпературных» полупроводников, в частности, карбида бора и нитрида бора, а также получению монокристаллов бора.

В последнее время в обеих лабораториях много внимания уделялось сравнению и тщательному анализу методов определения «характеристических времен» или «времен жизни» носителей заряда в полупроводниках, так как разнообразие применяемых методов в многочисленных работах в этой области часто вызывало противоречие результатов у разных авторов. По мнению многих из американских физиков, наиболее прямые и правильные результаты дает модификация так называемого «дрейфового» метода, впервые осуществленного Р. Хейнсом и В. Шокли, в которой возбуждение избыточных электронов и дырок проводится в тонком сечении кристалла импульсом проникающего инфракрасного света, а затем наблюдается спадение избыточной концентрации при дрейфе носителей в электрическом поле вдоль кристалла. Для измерения очень малых времен жизни в лаборатории Белл успешно используется возбуждение короткими (10^{-8} *сек*) импульсами быстрых электронов от электростатического генератора на 1 *Мэв*.

Большой интерес для нас представляло направление работы группы У. Брауна (лаб. Белл), занятой исследованием возникновения под действием быстрых частиц и восстановления структурных дефектов и влияния этих дефектов на электропроводность и рекомбинацию носителей заряда. В последнее время создается впечатление, что простые представления об образовании дефектов Френкеля, а также теория диффузии междоузельных атомов и пустых узлов, данная Брауном и Флетчером в 1953 г., в реальных кристаллах сильно осложнены взаимодействием дефектов с примесями. Для исследования дефектов структуры помимо обычных методов измерения

электропроводности и эффекта Холла успешно используется наблюдение спинового электронного резонанса.

Установка Р. Хейнса, о новых результатах которого уже упоминалось выше, позволяет наблюдать с очень большой разрешающей способностью слабое инфракрасное излучение германия и кремния, связанное с разными типами электронных переходов при захвате и рекомбинации. Основные части установки представляют спектрограф «Перкин-Эльмер» с узкополосным усилителем и синхронным детектором и криостат с жидким гелием или водородом, в котором расположена тонкая пластинка исследуемого полупроводника, освещаемая с одной стороны интенсивным пучком коротковолнового света, поглощаемого в тонком слое вблизи поверхности.

Как уже было указано выше, лаборатории Белл и Джeneral Электрик являются крупнейшими, хорошо оборудованными исследовательскими центрами. Обе лаборатории расположены вдали от населенных пунктов и окружены парками. Лаборатории систематически расширяют, достраивая новые корпуса, последние из которых полностью оборудованы установками для кондиционирования и обеспыливания воздуха. В помещениях имеется централизованная подача сжатого воздуха и таких газов, как азот и кислород, а также форвакуумная система. Обращает на себя внимание широкое использование жидкого гелия в очень простых криостатах (цена жидкого гелия составляет около 2 долл. за литр), а также жидкого водорода. Техника безопасности работы с водородом проста, но, по-видимому, достаточно надежна.

Основные рабочие группы, как правило, состоят из 2—3 человек: доктора (степень доктора в США очень близка к степени кандидата наук в СССР) и 1—2 высококвалифицированных ассистентов или лаборантов. Такая группа обычно занимает комнату или 2 комнаты общей площадью 30—40 кв. м. Известные ученые, в том числе и В. Брэттен, Дж. Бардин, Р. Хейнс, основную часть времени заняты непосредственно экспериментальной работой. Большое внимание уделяется личному общению физиков на многочисленных конференциях и съездах, происходящих не менее 4—6 раз в год. Административные обязанности несут сотрудники, имеющие высшее образование и степень доктора, но обычно не являющиеся выдающимися учеными.

Конструкторские бюро и заводы, занятые производством приборов, также являются частью «Системы Белл» и «Дженерал Электрик», но «Отделы фундаментальных физических исследований», с сотрудниками которых мы встречались, в настоящее время не проводят исследований, непосредственно связанных с разработкой приборов. Имеет место усиливающаяся тенденция приглашать для работы по физике полупроводников в лабораториях фирм видных теоретиков и специалистов по математической физике, таких, как Херринг, Герман, Конвелл, что, несомненно, в конечном итоге приводит к повышению общего уровня исследований, быстро влияющему на практические результаты.

В. С. Вавилов