

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

(Вторая Международная конференция по фотопроводимости)

1. Вторая Международная конференция по фотопроводимости была проведена в августе 1961 г. в Корнельском университете, г. Итака, США.

Основными вопросами, обсуждавшимися на конференции, были взаимодействие света с полупроводниками и диэлектриками, включая сюда первичные процессы поглощения света и фотоионизации, и последующие явления — движение неравновесных электронов и дырок и их рекомбинацию. На конференции не обсуждались технические вопросы, связанные с полупроводниковыми инфракрасными детекторами. Однако ряд докладов был посвящен физическим процессам, определяющим чувствительность, инерционность и спектральные характеристики инфракрасных детекторов на основе таких полупроводников, как легированный германий, кремний, антимонид индия и др.

Темы докладов довольно условно были разделены следующим образом: 1. Рекомбинация неравновесных носителей. 2. Оптические эффекты вблизи края основной полосы поглощения. 3. Электрооптические эффекты. 4. Фотогальваномагнитные явления. 5. Явления, связанные с контактами. 6. Фотопроводимость в соединениях II—VI групп системы Менделеева. 7. Фотопроводимость в далекой инфракрасной области спектра. 8. Фотопроводимость в ионных кристаллах. 9. Связь фотопроводимости и внешнего фотоэффекта. 10. Шумы в полупроводниках.

Сравнительно небольшое число докладов (53) было обусловлено желанием организаторов ограничить тематику конференции наиболее принципиальными вопросами.

На конференции присутствовало около 300 ученых из Великобритании, ГДР, Голландии, Израиля, Канады, Польши, СССР, США, Франции, ФРГ, Чехословакии, Японии.

Академией наук СССР были направлены на конференцию пять докладов: В. Г. Алексеевой, С. Г. Калашникова, И. В. Карповой, Е. Г. Ландсберг «Рекомбинационные свойства марганца и золота в германии» (ИРЭ АН СССР); В. С. Вавилова, Э. Н. Лотковой, А. Ф. Плотникова «Инфракрасное поглощение и фотопроводимость в кремнии, облученном нейтронами» (ФИАН); Е. Ф. Гросса и Б. В. Новикова «Тонкая структура спектральных кривых фотопроводимости и люминесценции и их связь с экситонным поглощением» (ЛФТИ); Я. Е. Покровского, К. И. Свистуновой «Рекомбинационные процессы в кремнии, легированном In, Ga и Sb»; (ИРЭ АН СССР); С. М. Рыбкина «Кинетика примесной фотопроводимости» (ЛФТИ). Эти статьи будут опубликованы в советских журналах; в связи с этим мы ограничиваемся упоминанием тем докладов. Труды конференции составили отдельный выпуск международного журнала «Journ. of Physics and Chemistry of Solids» в январе — феврале 1962 г.

Следует отметить дружеское и внимательное отношение видных американских ученых — организаторов конференции, в первую очередь проф. А. Роуза, Э. Бурштейна, Г. Фэна, а также Г. Левинштейна, Р. Спроула, А. Хатсона, Дж. Хейнса, к делегации Академии наук СССР.

Рассмотрим теперь содержание некоторых докладов, прочитанных на конференции. Следует заметить, что выбор тем докладов и подробность их изложения в значительной мере определяются научными интересами авторов настоящей заметки. Изложение работ мы начнем с интересной работы Т. Мосса (T. S. Moss) (Королевский Авиационный институт, Англия), в которой обсуждалась возможность некоторых новых явлений фотопроводимости, на которые до настоящего времени не обращали достаточного внимания. Обычно рассматриваемые явления заключаются в возбуждении носителей заряда из связанных состояний в свободные. Если, однако, радиация вызывает переходы электронов или дырок из состояния с подвижностью μ_1 в другое

состояние с подвижностью μ_2 , то хотя общее число подвижных частиц остается неизменным, будет наблюдаться изменение проводимости.

$$\Delta\sigma = \Delta n \cdot e (\mu_2 - \mu_1).$$

При этом $\Delta n = Q\tau$, где Q — число поглощаемых фотонов (в единицу времени и в единице объема), а τ — время жизни в возбужденном состоянии.

В работе рассматриваются различные возможные типы таких переходов. Особый интерес, однако, представляют два типа переходов. Первый из них — переходы между уровнями Ландау в полупроводнике при наличии магнитного поля. Оценка, произведенная автором для InSb, показывает, что при температуре жидкого азота и в поле 38 кэ расстояние между двумя низшими уровнями Ландау равно 0,047 эв, что соответствует длине возбуждающей волны 26 мк. Оценка дает, что при переходе электронов с первого уровня Ландау на второй подвижность должна изменяться в 1,3 раза и поэтому можно ожидать, что эффект будет наблюдаем.

Второй интересный тип переходов — переходы внутри самой зоны проводимости, что представляет, по существу, образование «горячих» электронов. При этом изменение подвижности возникает не за счет изменения эффективной массы, а за счет зависимости процессов рассеяния на примесях от энергии электронов. Приближенная оценка, произведенная автором, показывает, что при низких температурах (чисто примесное рассеяние) относительное изменение напряжения вследствие фотопроводимости $\Delta V/V$ должно иметь порядок

$$\frac{\Delta V}{V} \sim \frac{P\tau_e}{NkT},$$

где P — поглощаемая мощность излучения в единице объема, τ_e — время релаксации энергии, N — полная концентрация носителей в образце. В случае InSb при 2° К τ_e очень велико и имеет порядок 10^{-7} сек. Это дает для пороговой чувствительности (напряжение сигнала равно напряжению тепловых шумов) величину $\sim 10^{-14}$ вт (для малых образцов). Поэтому эффект должен быть легко наблюдаем и, возможно, будет полезен для разработки эффективных детекторов длинноволнового инфракрасного излучения.

В докладе отмечено, что для обнаружения очень длинноволнового инфракрасного излучения и радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазона можно использовать сверхпроводники. Предлагается использовать диод, состоящий либо из металла — тонкого окисного слоя — сверхпроводника, или из сверхпроводника — окисного слоя — другого сверхпроводника, и использовать туннельные токи в таких системах. Туннельные вольт-амперные характеристики в таких системах (без освещения и без исследования их свойств как детекторов излучения) уже наблюдались экспериментально. Наиболее важным параметром и здесь является время жизни носителей в возбужденном состоянии. Автор сообщает, что произведенные им грубые оценки показывают, что если $\tau > 10^{-11}$ сек, то эффект можно будет наблюдать, а если окажется возможным сделать $\tau > 10^{-6}$ сек, то такие системы будут очень хорошими детекторами излучения с порогом по длине волны, в зависимости от типа сверхпроводника, от 500 мк до нескольких миллиметров.

В работе Г. С. Пикуса (G. S. Picus) (Лаборатория компании Хьюз, США) «Рекомбинационные процессы при фотопроводимости в далекой инфракрасной области» исследовались проводимость, фотоответ и шумы в германии, содержащем цинк, медь и индий, и зависимость этих величин от приложенного напряжения и подсветки при температуре 4,2° К. Такие кристаллы обнаруживают резкие аномалии поведения по сравнению с обычными линейными фотосопротивлениями. Цель работы заключалась в получении сведений о механизме генерации и рекомбинации носителей заряда в таких полупроводниках при низкой температуре и в попытке с помощью этих данных объяснить аномальные свойства таких кристаллов.

Наиболее важные и необычные результаты, наблюдаемые в кристаллах всех трех типов, относятся к вольт-амперной характеристике и шумам. Так, например, в германии с цинком линейная зависимость тока (i) от напряжения (V) наблюдается только при полях ниже 15 в/см. Начиная с полей 20 в/см и выше наблюдается экспоненциальная характеристика типа $i = i_0 \exp \frac{V}{V_0}$. При полях 405 в/см наблюдается сильно-

выраженное явление пробоя и ток возрастает на несколько порядков при ничтожном увеличении поля. Параметры i_0 и V_0 зависят от внешнего излучения (черного тела) i_0 пропорционально W^n , где W — поток излучения, а показатель n близок к единице. Напряжение V_0 пропорционально $\ln W$. Мощность шумов оказалась сложно зависящей от напряжения смещения. Шумы сильно изменялись от образца к образцу и, по-видимому, сильно зависели от типа электродов и от полярности приложенного напряжения. Общим для всех кристаллов было сильное возрастание шумов вблизи напряжения пробоя. Фотоответ в этой области резко уменьшался. Общие черты этих явлений

Основные результаты работы заключаются в следующем. Сечение захвата электронов на ионизованные атомы фосфора найдено равным $\sigma_n^+ = 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$ при 3° K . Оно слабо зависит от температуры и для большинства образцов изменялось как $T^{-1/2}$. Сопоставление этих результатов с имеющимися теориями показывает, что ни одна из них не может объяснить ни величины сечения (оно приблизительно в 10 раз больше, чем предсказывается каскадной теорией М. Лэкса), ни наблюдаемой слабой температурной зависимости.

Автором найдено также, что подвижность электронов, возбуждаемых длиной волны 2 мк , значительно больше подвижности при возбуждении длиной волны $8\text{--}25 \text{ м}$. Отсюда сделан вывод, что при возбуждении более короткими длинами волн имеют место переходы другого типа, предположительно в другую зону или в другой минимум основной зоны.

Сходные результаты, но для других центров рекомбинации и полученные иным методом, были приведены в докладе Рупрехта (G. Rupprecht) (Лаборатория компании Райтсон, США) «Температурная зависимость сечения захвата для дырок у атомов золота в германии». Автор определял сечение захвата дырок для акцепторного уровня золота $0,145 \text{ эв}$ с помощью разработанного им метода импульсного эффекта поля (см. Труды Международной конференции по физике полупроводников, Прага, 1960 г.). Это сечение равно около $3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ и в исследованном интервале температур $50\text{--}100^\circ \text{ K}$ изменяется приблизительно как $T^{-1/2}$. Автор отмечает, что этот результат является неожиданным с точки зрения каскадной теории М. Лэкса, которая, казалось бы, должна быть хорошо применима к захватам такого типа (при наличии кулоновского притяжения), но которая предсказывает другую температурную зависимость сечения ($\sim T^{-4}$). Это расхождение между теорией и опытом, по мнению автора, показывает, что вопрос о механизме элементарных актов захвата носителей заряда на примесные центры остается до настоящего времени нерешенным. В докладе также отмечается, что аналогичное несогласие теории и опыта имеет место и для атомов никеля и марганца в германии, хотя экспериментальные данные для этих элементов и менее точны, чем для золота.

В работе Аскарелли и Родригеса (G. Ascarelli, Иллинойский Университет, S. Rodrigez, Университет Пардью, США) «Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках» сделана попытка усовершенствования каскадной теории захвата. Предложенный вариант в принципе совпадает с теорией М. Лэкса, но отличается в деталях модели центра и способа расчета.

Авторы вычислили сечение захвата мышьяка и сурьмы в германии при гелиевых температурах и сопоставили их с экспериментальными данными и с результатами каскадной теории Лэкса. При этом оказалось, что: а) данная теория лучше согласуется с экспериментом, чем теория Лэкса; б) температурная зависимость сечений захвата при температурах ниже 4° K получается такой же, как в теории Лэкса; в) при более высоких температурах данная теория дает более слабую температурную зависимость, чем теория Лэкса. При очень низких температурах температурные зависимости сечений захвата в обеих теориях получаются сильно различными.

Исследованию свойств примесных атомов как центров рекомбинации была посвящена также работа Вильямса (R. L. Williams) (Канада) «Время жизни электронов и дырок в германии n -типа с золотом».

В работе исследовались фотопроводимость и фотомагнитный эффект в германии n -типа, содержащем золото, в области температур $60\text{--}400^\circ \text{ K}$. Использовались образцы германия, в которых второй акцепторный уровень золота ($0,20 \text{ эв}$ от зоны проводимости) был частично компенсирован донорами. Концентрация атомов золота и компенсирующих доноров определялась из измерений температурной зависимости постоянной Холла и удельного сопротивления. При интерпретации экспериментальных данных предполагалось, что действует один рекомбинационный уровень золота ($0,20 \text{ эв}$). Использовались выражения для токов короткого замыкания фотопроводимости и фотомагнитного эффекта, данные в работе Зиттера (1958).

Опыты обнаружили сильно выраженные явления прилипания дырок, что проявлялось в резком различии времен жизни, определенных из фотопроводимости и из фотомагнитного эффекта. Явления прилипания возникали при температуре ниже комнатной. Сопоставляя экспериментальные данные со статистикой рекомбинации, автор определил два сечения захвата (для электронов и дырок) атомов золота. Для захвата дырок на дважды заряженные ионы золота найдено: $\sigma_n^+ = (1,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ (300° K). Температурная зависимость этого сечения в работе не определена. Сечение захвата электронов на однократно заряженные ионы золота оказалось равным

$$\sigma_n^- = (1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 (300^\circ \text{ K}).$$

Найдено, что оно слабо зависит от температуры.

Данная работа по цели и методике близка к упомянутому докладу В. Г. Алексеевой и др. Основные результаты автора близки к результатам других работ по исследованию рекомбинационных свойств атомов золота в германии.

были такими же в кристаллах с медью и индием, хотя детали были несколько различны.

В работе указываются две возможные причины наблюдаемых аномалий: либо зависимость подвижности μ , либо зависимость времени жизни τ от поля и интенсивности подсветки. Однако предварительные опыты, произведенные автором по исследованию зависимости подвижности от поля в кристаллах германия с медью, показали, что при полях ниже пробойного и, в частности, во всей области экспоненциальной зависимости μ от V μ от поля не зависит. Поэтому автор считает, что найденные им результаты обозначают зависимость τ от энергии электронов и являются следствием образования горячих электронов под действием поля постоянного смещения.

Хотя в работе не дано количественного объяснения наблюдавшихся явлений, она представляет существенный интерес, так как, во-первых, содержит ряд интересных экспериментальных данных об ударной ионизации примесей в германии и, во-вторых, показывает, что при определенных условиях горячие электроны могут играть существенную роль в процессах, происходящих в полупроводниковых детекторах инфракрасного излучения.

Большой интерес представляет работа Пу т л и (Е. Н. Putley) (Королевский Радиолокационный институт, Мальверн, Англия) «Примесная фотопроводимость в сурьмянистом индии n -типа». В работе наблюдалась и исследовалась фотопроводимость в очень чистых кристаллах InSb (примесная концентрация электронов около $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) при гелиевых температурах при облучении радиоволнами миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. В кристаллах InSb, вследствие их большой диэлектрической проницаемости, могут возникать очень мелкие уровни энергии примесных атомов, что находится в согласии с водородоподобной моделью примесных центров. Эти уровни настолько малы, что уже при очень малых концентрациях примесей, порядка 10^{13} см^{-3} или даже меньше, волновые функции примесных центров заметно перекрываются, вследствие чего возникают примесные зоны и энергия ионизации становится равной нулю. Однако при наложении магнитного поля порядка 10^3 — 10^4 э, появляются вновь дискретные уровни с энергией ионизации порядка 10^{-4} — 10^{-3} эв, что соответствует длинам волн субмиллиметрового и миллиметрового диапазона.

Автор наблюдал примесную фотопроводимость в интервале длин волн от 0,1 мм вплоть до 8,6 мм. Постоянная времени затухания фотопроводимости оказалась порядка 1 мксек или даже меньше. Наряду с фотопроводимостью в работе исследовались также электрические свойства кристаллов (эффект Холла, изменение сопротивления в магнитном поле и эффекты, связанные с образованием горячих электронов). Фотопроводимость и электрические свойства, как и следовало ожидать, сильно зависят от магнитного поля.

Значительное число докладов было посвящено исследованию процессов рекомбинации электронов и дырок и кинетике фотопроводимости. При этом особое внимание уделялось экспериментальной проверке известной теории «гигантских ловушек» М. Лэкса (многофононная каскадная теория захвата).

В работе Х о н и г а и Л е в и т т а (Сиракузский университет, США) (А. Honig, R. S. Levitt) «Время жизни электронов и примесная фотопроводимость в кремнии n -типа, легированном элементами 3-й и 5-й групп» исследовалась фотопроводимость и спиновый резонанс в кремнии n -типа, содержащем фосфор и (в качестве компенсирующей примеси) бор. Исследования проведены в интервале температур 4,2—1,2° К. Основная цель работы заключалась в определении сечения захвата ионов P^+ для электронов и его зависимости от температуры, а также сопоставлении результатов с теорией для выяснения механизма элементарных актов захвата электронов на примесные центры. В работе измерялась стационарная фотопроводимость и определялось время жизни τ электронов в зоне по соотношению

$$\tau = \frac{n}{gN_D^0},$$

где n — концентрация избыточных электронов, g — вероятность ионизации нейтрального донора светом, N_D^0 — концентрация нейтральных доноров. Отсюда можно было найти коэффициент захвата электронов α и сечение захвата ионизованных доноров σ по обычным соотношениям: $\tau = (\alpha, N_A)^{-1}$, $\alpha = \sigma v$, где N_A — концентрация компенсирующих акцепторов, равная концентрации ионизованных доноров, а v — средняя тепловая скорость электронов в зоне.

Для выполнения этой программы необходимо было отдельно определять: вероятность генерации электронов g , концентрацию нейтральных доноров N_D^0 , концентрацию акцепторов N_A и концентрацию избыточных электронов n . Величина n находилась из измерений удельного сопротивления и подвижности при низких температурах. Для определения трех других величин автором был весьма остроумно использован спиновый резонанс и показано, что при надлежащем выборе условий опыта эти величины могут быть определены с большой точностью.

Интересному вопросу о рекомбинации горячих электронов и зависимости сечений захвата от скорости (энергии) захватываемых частиц были посвящены два доклада (теоретическая и экспериментальная части — Конуэлл и Цуккер (E. Conwell, J. Zucker) (США) «Рекомбинация горячих носителей заряда в германии». Эксперименты состояли в следующем. Образец германия имел вид цилиндра диаметром 5 мм; к одному из его торцов была приварена проволока длиной 2,5 мм и диаметром 0,25 мм. Проволока помещалась в волновод и ее конец заземлялся. Через волновод пропускались короткие (несколько *мксек*) мощные импульсы высокочастотных колебаний (2,85 *МГц*), создававших в волноводе сильное электрическое поле (до 12 000 *в/см* в пике), разогревающие электронный газ. Одновременно через образец пропусклся слабый постоянный ток (поле от 0,4 до 5 *в/см*) и образец освещался слабым постоянным светом (через отверстие в волноводе или внешнюю сторону образца). Сравнивая изменения проводимости образца под действием света без высокочастотного поля и при его наличии, можно было определить, как влияет разогревание электронного газа на скорость рекомбинации. Были исследованы «чистые» образцы германия (время жизни в них определялось поверхностной рекомбинацией) и образцы, в которые была введена медь.

Экспериментальные данные для изменения фотопроводимости под действием высокочастотного поля сравнивались затем с теоретическим выражением для этого эффекта, полученным Е. Конуэлл. Расчет проведен в предположении, что время жизни электронов в зоне есть некоторая функция их энергии, и затем результаты специализированы для двух случаев: когда сечения захвата центров рекомбинации обратно пропорциональны скорости электронов v и когда эти сечения вовсе не зависят от v . Сопоставление теории и опыта удалось провести до конца только для образцов p -типа, легированных медью. Экспериментальные данные не соответствовали точно ни одному из указанных случаев, но располагались ближе к теоретической кривой для первого случая. Отсюда авторы заключают, что сечение захвата однократных отрицательных ионов меди для электронов σ_n^- уменьшается при увеличении скорости электронов v и, приблизительно, пропорционально $1/v$.

Ряд докладов на конференции был посвящен исследованию фотопроводимости и электрических свойств полупроводниковых соединений, таких, как соединения элементов 2—6 группы (ZnS, CdS, ZnSe, CdSe), ZnO, PbS и других. Можно отметить, что для полупроводниковых соединений, которые в настоящее время могут быть уже получены в виде достаточно чистых монокристаллов, начинаются исследования локальных энергетических уровней, создаваемых в них примесными атомами различных элементов (подобно тому как это было сделано в последнее десятилетие для германия и кремния).

В этом отношении существенный интерес представляет доложенная работа Энглера, Левинштейна и Стэннарда (W. Engler, H. Levinstein, C. Stannard) (Сиракузский университет, США) «Фотопроводимость, обусловленная глубокими акцепторными примесями в антимониде индия». Работа имела целью определение энергетических уровней, создаваемых атомами серебра, золота и меди в антимониде индия, с помощью исследования примесной фотопроводимости. Известно, что в германии и кремнии атомы элементов, имеющие число валентных электронов на две единицы меньше, чем атомы основного кристалла, создают два акцепторных уровня энергии. То же самое имеет место для примесных атомов серебра, золота и меди в решетке антимонида индия. В предыдущей работе авторов эти уровни исследовались с помощью эффекта Холла (Bull. Amer. Phys. Soc. 6, 156, 1961). Однако при этом удалось измерить не все уровни. Чтобы восполнить этот пробел, были поставлены настоящие исследования. Исследование спектральной зависимости фотопроводимости в различных кристаллах, в которых был частично заполнен либо нижний, либо верхний уровень энергии, позволило обнаружить на кривых фотосигнал — длина волны ряд резких изломов. Эти изломы были истолкованы как включение (или выключение) различных типов электронных переходов, а именно: а) из валентной зоны на пустой нижний уровень, б) из валентной зоны на пустой верхний уровень, в) с заполненного нижнего уровня в зону проводимости, г) с заполненного верхнего уровня в зону проводимости.

В процессе исследования было обнаружено интересное явление. Для кристаллов с малым количеством компенсирующих доворов, в которых нижний уровень был заполнен электронами лишь частично, кривая фотоответ — длина волны обнаруживала большое число максимумов и минимумов. Если построить зависимость энергетического положения минимумов от номера минимума (считая за нуль длинноволновый порог фотопроводимости), то оказывается, что эта зависимость хорошо выражается прямой линией. Положение прямых зависит от рода примеси, но их наклон для всех исследованных примесей (Cu, Ag, Au) остается одинаковым. Наличие таких осцилляций фотоответа объясняется авторами наложением ряда спектральных кривых фотопроводимости, каждая из которых соответствует участию различного числа оптических продольных фононов. Длинноволновый порог соответствует переходу с испусканием одного продольного оптического фонона. Следующее нарастание фотопроводимости соответствует испусканию двух фононов и т. д. Поэтому разность в энергетическом положении

двух соседних минимумов дает энергию продольных оптических фононов при $k=0$. Авторы нашли, что эта энергия для всех образцов оказалась равной $0,0244$ эв, что хорошо согласуется со значением $0,024$ эв, полученным из исследования туннельного эффекта (R. N. Hall, I. H. Racette, H. Ehrenreich, Phys. Rev. Lett. 4, 456, 1960) и со значением $0,0244$ (полученным в опытах S. J. Fray, F. A. Johnson, R. H. Jones, Proc. Phys. Soc. 76, 939, 1960). В результате этих и предыдущих исследований (холл-эффект) авторы дают следующие значения уровней энергии, создаваемых атомами Cu, Ag и Au в решетке InSb (отсчитанные от верха валентной зоны).

Примесь	Верхний уровень, фотопроводимость (эв)	Нижний уровень, фотопроводимость (эв)	Нижний уровень, холл-эффект (эв)
Cu	0,056	0,026	0,023
Ag	0,039	0,028	0,023
Au	0,066	0,043	0,032

Работа У. С п а й с е р а (W. Spicer), Лаборатория RCA, США, посвящена исследованию процесса вторичной ударной ионизации фотоэлектронами.

Изучая распределение по энергиям фотоэлектронов из интерметаллического соединения Cs_3Sb , Апкер и Тафт в 1952 г. показали, что быстрые фотоэлектроны могут образовывать вторичные пары. Впоследствии это явление было обнаружено во многих других полупроводниках при изучении лавинного умножения числа носителей, а также при определении квантового выхода фотоионизации по фотопроводимости и фототоку в кристаллах с $P-N$ -переходами.

Одним из затруднений в интерпретации результатов измерений внутреннего фотоэффекта, связанного со вторичными парами, является отсутствие данных о распределении энергии поглощаемого фотона между возникающими электроном и дыркой (надо заметить, что для Ge и Si механизм поглощения фотонов вблизи края основной полосы достаточно изучен, чтобы устранить эти затруднения).

Для германия, кремния, InSb, PbS, а также CdTe экспериментально определенная пороговая энергия лежит между значениями, равными $\approx 2E_g$ и $\approx 4E_g$. Используемый Спайсером метод исследования спектров внешних фотоэлектронов имеет важное преимущество в том отношении, что значение энергии электрона вблизи порога известно однозначно. Существенными недостатками являются невозможность получения данных для дырок, а также экспериментальные трудности, связанные с выходом электронов из исследуемого кристалла.

Для измерения энергетического спектра электронов Спайсером был использован метод задерживающего потенциала в фотоэлементах, имеющих цилиндрическую симметрию. Задерживающий потенциал изменялся со скоростью около 1 в/мин. На него был наложен слабый синусоидальный сигнал. Измерялась переменная составляющая фототока на выходе, пропорциональная производной во времени (а следовательно, и от V , так как $V \sim t$) от «ампер-вольтовой» характеристики (фототок от приложенного напряжения). Как указывали Апкер и Тафт в 1959 г., процесс возникновения вторичных пар носителей обнаруживается по появлению на $i-V$ -характеристике группы медленных электронов. В соединениях щелочных металлов и сурьмы, а также в Cs_3Bi , энергия этих электронов, по-видимому, не зависит от энергии возбуждающих фотонов (после того как последняя превосходит пороговую).

Весьма интересно получить сведения о том, вызывает ли образование пар электронами или дырками и выходят ли из кристалла электроны, вызывающие возникновение вторичных пар. По мнению Спайсера, на эти вопросы можно ответить, изучая спектральное распределение квантового выхода. Квантовый выход внешнего фотоэффекта в большинстве исследованных им веществ достигает плато для энергий фотонов примерно на $0,5$ эв ниже порога образования пар и остается далее неизменным во всем спектральном интервале, до $h\nu=5,6$ эв.

Этот факт говорит о том, что обнаруженное образование пар обусловлено электронами, а не дырками. Постоянство квантового выхода указывает, что в среднем лишь один из двух возникших в акте ударной ионизации «свободных» электронов выходит из полупроводника.

Для веществ с упорядоченной структурой порог составляет приблизительно $3E_g$, что согласуется с результатами для Si, InSb и PbS, полученными другим методом, и с теорией, развитой Шокли. Для материалов с сильно нарушенной структурой, таких, как Cs_3Bi и Cs_3Sb , пороговая энергия приближается к ширине запрещенной

полосы. Это подтверждает предположение о том, что нарушение структуры приводит к облегчению выполнения закона сохранения импульса.

Опыты Спайсера позволили автору провести оценку среднего пробега фотоэлектрона до акта ударной ионизации, который близок к 15 Å в Cs_3Sb и Rb_3Sb при начальной энергии на 2 эв ниже пороговой.

Р. В и л я м с (R. Williams), Лаборатория RCA, США, в своем докладе сообщил о развитом им новом методе приложения и определения сильных электрических полей к монокристаллам CdS , имевшим высокую равновесную электропроводность. Исследовавшиеся кристаллы содержали 10^{16} — 10^{17} мелких донорных центров (галогиды). Поле прикладывалось к кристаллу с помощью жидкостного контакта (электролит), окружавшего среднюю часть длинной монокристаллической «ленточки». При приложении отрицательного смещения к «блокирующему» электролитическому контакту в кристалле возникло поле в области пространственного заряда ионизованных доноров. Согласно теории Мотта — Шоттки, связь между толщиной слоя пространственного заряда λ и приложенным напряжением V выражается как

$$\lambda = \left(\frac{\varepsilon V}{2\pi N e} \right)^{1/2} = 3,6 \cdot 10^3 \left(\frac{V}{N} \right)^{1/2},$$

где ε — статическое значение диэлектрической проницаемости, равное 11,6 для CdS , e — заряд электрона, N — концентрация доноров. Это уравнение было проверено количественно путем наблюдения «отсечки» сквозного тока i_1 сквозь кристалл. Эффект отсечки был воспроизводимым, обратимым (без гистерезиса) и не зависел от ионов электролита. Автор получил совпадение с теорией в пределах $\pm 10\%$.

Помимо мелких доноров на распределение поля могут влиять глубокие ловушки электронов. При значительной концентрации таких ловушек нарушается совпадение с простой теорией.

Описанный метод был применен автором для исследования электрического пробоя кристаллов CdS .

Напряженность поля, при которой в изучающихся кристаллах начинался пробой, различалась в пределах $(1 \div 2,5) \cdot 10^6$ в/см. Вначале предполагалось, что пробой связан с ударной ионизацией, и были поставлены опыты для наблюдения размножения носителей, инжектированных светом (подобно тому как это наблюдается в Ge и Si). Опыты дали отрицательный результат, и автор считает, что пробой обусловлен холодной эмиссией из валентной зоны в зону проводимости. В пользу этого, помимо отсутствия умножения числа носителей, имеются следующие аргументы: а) абсолютные величины напряженности поля, при которых начинается пробой, согласуются с теоретическими оценками для автоэлектронной эмиссии из зоны в зону; б) предпробойные токи экспоненциально зависят от напряженности поля, в количественном согласии с теорией. Автор указывает, что развитая методика удобна для изучения электрооптического эффекта Келдыша — Франца, который наблюдался В. С. Вавиловым и К. И. Бриггсом в кремнии и К. Бером в CdS .

Значительное внимание на конференции было уделено природе флуктуаций и шумов, свойственных явлениям фотопроводимости. Остановимся коротко на некоторых из докладов, посвященных этому вопросу.

Р. Б е р д ж е с с (R. Burgess) (Канада) в своем сообщении рассмотрел особенности флуктуаций, обусловленные избытком кинетической энергии фотоэлектронов и конкурирующими процессами их термализации и ударной ионизации. Эти явления сопоставлялись с процессами в сильных электрических полях, когда «разогрев» носителей в поле и ударная ионизация являются причиной избыточных шумов. В работе рассматривается возможность возникновения состояний с «отрицательной температурой», которые являются основой процессов «стимулированного излучения» в полупроводниках.

Известный английский физик П. Л а н д с б е р г (P. T. Landsberg) в своем докладе обобщил теоретические представления о равновесных рекомбинационно-генерационных шумах в полупроводниках с учетом типа рекомбинационного перехода и зонной структуры.

Экспериментальному исследованию шумов в кристаллах германия, содержащего примесные центры с глубокими уровнями (золото), была посвящена работа Нейрингера Л. (L. Neuringer) и У. Бернарда (W. Bernard) (Лаборатория Райтеон, США). Как известно, причиной возникновения генерационно-рекомбинационных шумов в полупроводниках является модуляция электропроводности случайными термическими флуктуациями носителей заряда, переходящих из зоны проводимости (или валентной зоны) на уровни примеси. В случае примесей с двумя глубокими уровнями, таких, как золото в германии, можно осуществить условие, когда оба уровня участвуют в процессах генерации и рекомбинации носителей и, следовательно, в создании флуктуации проводимости.

В работе изучался германий, в котором уровень Ферми был расположен между донорным уровнем 0,041 эв и акцепторным уровнем с энергией 0,145 эв. В этом

случае спектр шумов обнаруживал времена релаксации, характерные для обоих уровней.

Развитая авторами теория и результаты исследования флуктуаций (шумов) в области 10^4 — 10^7 гц позволили оценить сечения захвата свободных дырок донорным уровнем $0,041$ эв и акцепторным уровнем $0,145$ эв в германии p -типа. Использование величин сечений захвата $\sigma_A = 1,55 \cdot 10^{-12}$ см² и $\sigma_D = 3,75 \cdot 10^{-18}$ см², согласующихся с данными других, независимых опытов, дало хорошее совпадение теории с экспериментом.

ПОСЕЩЕНИЕ ДЕЛЕГАЦИЕЙ АН СССР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕНТРОВ США

По окончании конференции, воспользовавшись любезными приглашениями видных американских ученых проф. Г. Фэна (H. Fan), Дж. Крумханзла (J. Krumhansl), Г. Левинштейна (H. Levinstein), А. Хонига (A. Hönig), Дж. Хейнса (J. R. Haynes) и других, мы посетили ряд ведущих лабораторий США и ознакомились с работами по изучению оптических явлений в полупроводниках. В связи с ограниченным временем пребывания в США мы не смогли воспользоваться всеми полученными нами приглашениями.

Мы надеемся, что некоторые наши впечатления о работе американских ученых и о подготовке специалистов по физике полупроводников в университетах США представят интерес для советских читателей.

Крайне интересным для нас, в связи с направлением наших собственных работ, оказалось посещение университета Пардью (г. Лафайетт, штат Индиана). Университет Пардью хорошо известен специалистам по физике полупроводников выдающимися работами по оптике полупроводников и действию ядерных излучений на полупроводники. Этот университет является одним из основных центров США, готовящих высококвалифицированных специалистов по физике полупроводников, которые часто вскоре после получения докторской степени и перехода в лаборатории фирм (например, Bell System, General Electric и др.) становятся ведущими научными работниками.

До настоящего времени из советских ученых лаборатории Университета Пардью посетил проф. Н. Н. Соболев (ФИАН). Наше посещение стало возможным благодаря приглашению заведующего Отделом физики твердого тела проф. Г. Фэна. Следует отметить, что правление и сотрудники университета проявляют большое радушие к советским ученым и ученым стран народной демократии. В ближайшее время Университет Пардью ожидает приезда аспиранта из Новосибирского электротехнического института. В настоящее время среди аспирантов Отдела физики твердого тела работают два прикомандированных польских физика.

Работы по исследованию действия ядерных частиц на полупроводники были начаты в Пардью более 11 лет назад под руководством покойного проф. К. Ларк-Горовица и продолжаются в широком масштабе в настоящее время. Помимо проф. Фэна руководителями работ являются проф. Дж. Мак-Кей, проф. Клоуцц и др. Основное оборудование лаборатории для работ в этой области представляют два линейных ускорителя, один с энергией 1 Мэв, другой — до 5 Мэв, и электростатический генератор с энергией 1 Мэв и средним током электронного пучка в 200 мка. Опыты, требующие облучения нейтронами, ведутся с помощью лабораторий Атомной Комиссии в Ок-Ридже и Аргонне (около Чикаго), так как Университет Пардью не имеет своего реактора. Практически весь штат экспериментаторов, ведущих исследования, составляют аспиранты (post graduate students) и студенты старших курсов, часть которых работает одновременно и в качестве лаборантов. Последнее характерно также и для других университетов США, с лабораториями которых мы ознакомились.

В настоящее время основной задачей в исследовании действия ядерных частиц на полупроводники (германий, кремний, интерметаллиды InSb, GaSb и др.) является выяснение сущности первичного процесса возникновения дефектов, а также системы энергетических уровней дефектов в запрещенной полосе. Интересные возможности представляет исследование малостабильных дефектов, исчезающих (восстанавливающихся) уже при температуре между 20 и 300° К. В лаборатории проф. Дж. Мак-Кея разработана методика исследования монокристаллов полупроводников, подвергаемых бомбардировке при очень низких температурах (от 4° К). При этом удается обнаруживать и изучать разницу между последствиями импульсной бомбардировки и непрерывной бомбардировки быстрыми электронами при одинаковых интегральных потоках электронов. Вторым основным экспериментальным направлением лаборатории полупроводников в Пардью являются исследования поглощения и фотопроводимости в далекой инфракрасной области спектра (до 300 м). Научным руководителем этого направления является проф. Г. Фэн, а основными экспериментаторами — д-ра П. Фишер и М. Беккер. Интересно заметить, что хотя в области длин волн до 40 м в исследованиях применяются стандартные универсальные спектрографы фирмы «Бекман», результаты в области до 300 мк получены на спектрографе с эшелеттом, сконструирован-

ным П. Фишером и построенном, за исключением эшелетта, в мастерских университета. Полученные Фишером и другими учеными этой лаборатории данные о тонкой структуре спектров примесного поглощения в кристаллах германия (область длин волн 100—200 μ) являются в настоящее время своеобразным рекордом в спектроскопии твердого тела.

Интересы учеников и сотрудников Г. И. Фэна сосредоточены в настоящее время на проблемах исследования тонкой структуры спектров поглощения, связанной с возбуждением и фотоионизацией мелких донорных и акцепторных уровней в германии и кремнии; на исследовании поглощения и фотопроводимости, обусловленной радиационными дефектами в кремнии; на спектроскопии рекомбинационного излучения в соединении GaSb.

Лаборатории Отдела физики твердого тела Корнельского университета (проф. Крумханзл) ведут интенсивную исследовательскую работу в области физики полупроводников с широкой запрещенной полосой, а также щелочно-галогидных кристаллов и окислов. Основной задачей является изучение свойств F -центров и других точечных дефектов, а также дислокаций, в частности, их влияние на теплопроводность. Большой интерес представляют прецизионные работы по спектроскопии рентгеновского излучения, где при энергии квантов в области до 10 кэв получается разрешение, достаточное для наблюдения экситонных спектров.

Руководитель Отдела физики твердого тела проф. Крумханзл является крупным специалистом в области теории инфракрасного поглощения кристаллов и динамики кристаллических решеток. В настоящее время в лаборатории начались эксперименты по использованию эффекта Мессбауэра для изучения состояний ядра He^3 . Работы по ядерной и атомной физике и работы в области физики твердого тела ведутся в тесном контакте. Руководство Отдела физики Корнельского университета считает правильным и поддерживает разнообразие тематики работ в лабораториях университета. В лабораториях хорошо поставлена экспериментальная работа при сверхнизких температурах (до 1,2° K). Ведется исследование спинового электронного резонанса на примесных центрах в кристаллофосфорах.

Из работ по физике полупроводников большой интерес представляют исследования проф. Р. Спроула механизма теплопроводности и электропроводности при очень низких температурах, позволяющие получить сведения о точечных дефектах структуры в совершенных кристаллах. Проф. Спроул недавно начал работу и с кристаллами, облученными нейтронами.

Лаборатория Отдела физики твердого тела университета, г. Сиракузы (штат Нью-Йорк) в течение многих лет занималась вопросами повышения чувствительности и расширения рабочей спектральной области инфракрасных полупроводниковых детекторов. Работа частично носила практический характер (разработка и испытание свойств ИК детекторов разных типов). Руководителем этих работ является проф. Г. Левинштейн. В числе изучавшихся полупроводниковых материалов — германий, легированный золотом и цинком, соединение InSb и др. В ходе работы развита интересная методика определения малых времен жизни носителей, с модулятором светового возбуждения, позволяющим получать фронты импульсов порядка $5 \cdot 10^{-8}$ сек.

В настоящее время проф. Левинштейн совместно с другими сотрудниками отдела ведет исследование электрических свойств антимонида индия и примесной фотопроводимости в этом соединении.

Быстрыми темпами ведется исследование спинового электронного резонанса в кремнии и др. полупроводниках, в том числе при сверхнизких температурах до 1,2° K (проф. А. Хониг, одна из работ которого уже была рассмотрена выше).

Лаборатории компании «Белл-телефон» (Мэрри-Хилл, Нью-Джерси, США) известны как крупнейший центр исследований по физике полупроводников. В связи с тем, что в «Успехах физических наук» уже публиковались материалы, связанные с посещением советскими учеными лабораторий «Белл», мы остановимся только на исследованиях рекомбинационного излучения в кремнии, проводимых д-ром Хейнсом, и работах доктора Вертгейма по изучению эффекта Мессбауэра.

Полученные в последнее время д-ром Хейнсом результаты заключаются в основном в следующем. При освещении чистых кристаллов кремния (собственное возбуждение) при 25° K наблюдается рекомбинационное излучение, состоящее практически из одной линии, центр которой соответствует фотонам с энергией около $E=1,10$ эв. Эта энергия меньше ширины запрещенной зоны и меньше энергии экситона $E_0=1,155$ эв. Так как разность E_0-E соответствует энергии поперечных оптических фононов (ТО), то автор заключает, что при образовании пар электрон — дырка образуются экситоны, и последние распадаются с испусканием фотона (рекомбинационное излучение) и ТО-фонона.

При введении в кремний доноров V группы, например мышьяка, спектр рекомбинационного излучения резко изменяется. В нем появляются две сильные, очень узкие линии с энергией меньше (1,091 эв) и больше (1,149 эв) E , а также ряд других более

слабых линий. Ширина этих линий очень мала ($< 0,0005$ эв) по сравнению с основной линией экситонного излучения ($\sim 0,01$ эв). Отсюда автор делает вывод, что узкие линии обусловлены рекомбинацией электрона и дырки в неподвижном состоянии. Интенсивность резких линий пропорциональна концентрации доноров, следовательно, электрон и дырка связаны в виде некоторого электронного комплекса с ионом донора.

Разница в энергии фотонов у двух резких линий равна энергии поперечных оптических (ТО) фононов. Отсюда видно, что рекомбинация может идти как с участием фононов (линия $1,091$ эв), так и без них (линия $1,149$ эв).

Так как основная линия экситонного излучения и линия $1,091$ эв связаны с испусканием одного и того же фонона, то разность их энергий должна быть равна энергии диссоциации комплекса E_D , т. е. энергии, необходимой для отрыва дырки и электрона в форме экситона. Из опытов найдено, что $E_D = 0,0065$ эв.

Анализируя различные возможности, автор делает вывод, что указанные комплексы представляют собой образование из четырех частиц: положительного иона донора и дырки, удерживаемых парной связью двух электронов (аналогия с молекулой водорода). В случае акцепторов электронный комплекс следует представлять как отрицательно заряженный ион и электрон, удерживаемый парной связью дырок.

В настоящее время продолжается изучение структуры спектров рекомбинационного излучения. Экспериментальные данные сопоставляются с данными (зайствованными из литературы) об энергиях фононов различных типов и их зависимости от волнового вектора (данные из дифракции нейтронов). Такое сопоставление позволяет объяснить многие другие линии спектра излучения.

Описанная работа представляет большой научный интерес, так как приводит к новым представлениям о механизме элементарных актов рекомбинации с участием экситонов. К сожалению, до настоящего времени автор проводит только относительные измерения интенсивностей. Поэтому пока нельзя сказать, какую роль играют эти процессы по сравнению с другими процессами захвата и рекомбинации без участия экситонов.

Д-р Г. К. Вертгейм, в течение ряда лет занимавшийся изучением процессов рекомбинации в полупроводниках, прекратил эти работы и последние два года занимается исследованием эффекта Мессбауэра и его применениями в физике твердого тела.

Экспериментальные установки, используемые им, в принципе не отличаются от описанных в литературе и содержат источник γ -лучей, поглотитель и счетчик с пересчетным устройством. Исследуемые кристаллы являются либо источником, либо поглотителем. Для модуляции энергии используется вибрационное движение поглотителя (или источника), причем в ряде случаев поддерживается не постоянная скорость, а постоянное ускорение. Это позволяет в течение одного периода пройти определенный интервал энергий и с помощью осциллографического устройства записать кривую зависимости коэффициента поглощения γ -лучей от энергии. При исследовании сверхтонкой структуры линий поглощения употребляется источник, не обладающий сложной структурой спектра испускания, что упрощает интерпретацию данных. В качестве такового используется изотоп Fe^{57} , получающийся при распаде Co^{57} , введенный в нежелезистую сталь.

Намеченная программа исследований включает в себя: определение величины локального магнитного поля в месте нахождения исследуемых атомов в решетке кристалла; определение градиентов электрического поля в узлах решетки кристалла; исследование распределения электрического заряда вблизи узлов решетки. До настоящего времени эффект Мессбауэра применялся д-ром Вертгеймом главным образом для исследования магнетизма (локальные поля). Изучалось расщепление ядерных уровней железа в металлических кристаллах железа, в ферритах, в двухфазном железе и в интерметаллических соединениях (кубические фазы Лавеса).

В. С. Вавилов, С. Г. Калашников