

## СЪЕЗДЫ И КОНФЕРЕНЦИИ

## ТРЕТЬЯ ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПОЛУПРОВОДНИКАМ

*Л. Грошев, Ленинград*

С 27 мая по 2 июня в Одессе состоялась III Всесоюзная конференция по полупроводникам. В ее работах приняли участие представители 15 научно-исследовательских институтов и лабораторий Ленинграда, Москвы, Одессы, Киева, Томска и ряда других городов. Совершенно не случайным является тот факт, что физическая конференция целиком посвящается полупроводникам, которые совсем недавно стали предметом серьезного изучения как нашей, так и заграничной физики.

Прежде физика твердого тела занималась, главным образом, изучением металлов и изоляторов, так как те и другие играют важную роль в технических вопросах. Однако в последнее время в технику все больше и больше стали проникать полупроводники, лежащие по своим свойствам между металлами и изоляторами. Это обстоятельство, естественно, заставило физиков обратить внимание на проблему полупроводников. О той интенсивной работе, которая проводится в этой области, можно судить по необычайно возросшему количеству экспериментальных и теоретических работ, публикуемых в русских и иностранных журналах.

В нашем Советском союзе, где больше, чем в какой-либо другой стране, осуществляется связь между наукой и техникой, проблема полупроводников также становится предметом изучения многих физиков. Нет почти ни одного института, где в той или иной мере не занимались бы полупроводниками. Тот факт, что на конференцию, где собираются лишь оригинальные, ведущиеся в настоящее время и еще неопубликованные работы, представляются около 50 докладов, является показателем интенсивной работы, проводимой советскими физиками в данной области.

Конференция была открыта акад. А. Ф. Иоффе. В своем вступительном слове он отметил, что для современной физики проблема полупроводников почти так же актуальна, как и проблема атомного ядра. Важность ее обусловливается тем, что многие свойства полупроводников, например электропроводность, изменяются в сотни и тысячи раз при включении в них ничтожных количеств примесей в десятые доли процента. При учете температурных воздействий это обстоятельство позволяет на одном и том же полупроводнике изучать свойства твердого тела во всех промежуточных стадиях — от хорошего изолятора до плохого металла. Кроме того, полупроводники обладают и другим ценным свойством. Они способны изменять свою электропроводность под влиянием освещения. При этом в одних случаях свет вызывает увеличение электропроводности на десятки процентов, в других в десятки и сотни раз, а иногда в сотни тысяч и даже миллионы раз. Эти свойства полупроводников широко используются в современной технике. Достаточно отметить только селеновые и купроксные выпрямители, применяемые в технике для выпрямления переменного тока, и твердые фотозлементы (с запорным слоем), превращающие падающую на них световую энергию в электрическую без дополнительного подвода энергии извне.

Работы конференции протекали по пяти основным вопросам: а) внешнему фотоэффекту в металлах, полупроводниках и изоляторах; б) темновой и световой проводимости полупроводников; в) кристаллическому фотозф-

фекту; г) внутреннему фотоэффекту в диэлектриках и д) вентильному фотоэффекту и выпрямлению.

Основной доклад по внешнему фотоэффекту был сделан П. И. Лукирским. В явлении внешнего фотоэффекта имеется одна особенность, которая до сих пор не могла быть объяснена. Мы говорим о селективной фотоэлектрической отдаче, наблюдавшейся на некоторых поверхностях. Прекрасными работами Айвса и его сотрудников было показано для тонких слоев щелочных металлов, что их фотоэлектрическая отдача определяется плотностью светового потока (квадрат светового вектора) на этой поверхности. Докладчик, развивая положения Айвса, применяет их к чистым металлическим поверхностям щелочных металлов. Исходным пунктом при этом является следующий факт. Свет проникает внутрь металлов на глубину, сравнимую с длиной световой волны, в то время как электроны вырываются наружу лишь из слоя толщиною приблизительно в  $10^{-6}$   $10^{-7}$  см. Поэтому нельзя ничем оправдать расчет фототока на единицу поглощенной в металле энергии, как это делалось раньше. Фототок нужно относить к единице той энергии, которая поглощается в тонком верхнем слое и непосредственно тратится на вырывание электронов наружу. Подобный просчет был произведен для зеркально гладких поверхностей щелочных металлов (жидкое состояние). При данном расчете принималось, что плотность энергии в слое, из которого электроны вырываются наружу, определяется квадратом светового вектора в слое, лежащем непосредственно под поверхностью металла. Данное допущение возможно сделать ввиду малости толщины этого слоя по сравнению с глубиной проникновения света в металл. В результате просчетов было показано, что фотоэлектрическая отдача, отнесенная к единице энергии, поглощенной лишь в верхнем слое, никакой селективности не обнаруживает и непрерывно возрастает по направлению от длинных волн к коротким. Таким образом селективный фотоэффект (спектральный и векториальный) для чистых металлов после своего 30-летнего существования должен быть упразднен и отнесен к чисто оптическим явлениям.

По вопросу о темновой и световой проводимости полупроводников основные доклады были сделаны А. Ф. Иоффе и Я. И. Френкелем. Затем в ряде докладов сотрудники Ленинградского физико-технического института изложили конкретный экспериментальный материал по тому же вопросу.

В докладе Я. И. Френкеля была разобрана квантово-механическая модель электронного полупроводника. В кристаллической решетке полупроводника часть электронов тепловым движением перебрасывается из нормальной сплошь заполненной полосы уровней в полосу проводимости. Эти переброшенные электроны обусловливают проводимость полупроводника. Однако основным моментом в излагаемой схеме—моментом, который особенно подчеркивается докладчиком, является то обстоятельство, что в проводимости электронных полупроводников кроме переброшенных электронов принимают участие так называемые „дырки“ (их не следует смешивать с „дырками“ Дирака). Когда электрон удаляется из занятой полосы в полосу проводимости, в первой появляются свободные квантовые уровни, которые могут быть заняты электронами других уровней той же полосы. Вновь освобождающиеся уровни, в свою очередь, заполняются новыми электронами и т. д. Этот процесс соответствует передвижению электрических зарядов. То же самое можно представить более наглядно, если перейти от энергетического описания к кинематическому.

При удалении электрона из данного участка кристалла, в нем остается положительный заряд. Это образование Я. И. Френкеля называет „дыркой“. Возникшая в данном месте „дырка“ заполняется электроном, передвинутым из другого участка кристалла, где, в свою очередь, образуется „дырка“, которая вновь заполняется электроном от другого соседнего участка и т. д. Если такой кристалл помещен в электрическое поле, то замещение происходит преимущественно в направлении потока электронов. Таким образом участок с недостающим электроном — „дырка“ — перемещается в элек-

трическом поле в направлении, противоположном движению электронов. Перенос зарядов происходит совершенно так же, как если бы двигались положительные заряды, хотя на самом деле положительные ионы вовсе не смещаются со своих мест в решетке кристалла, а движутся лишь электроны.

Движением "дырок" Я. И. Френкель объясняет ряд аномальных явлений, наблюдаемых на полупроводниках, например отрицательный эффект Холла, отрицательные термоэлектродвижущие силы и ряд других.

Для электропроводности электронных полупроводников существенную роль играют примеси. При этом одни примеси являются источником дополнительных электронов проводимости, другие же захватывают электроны и закрепляют их на себе (акцепторы).

Акад. А. Ф. Иоффе в своем обширном докладе подробно остановился на тепловой и световой проводимости полупроводников, опираясь в основном на экспериментальный материал, полученный им совместно с А. Ф. Иоффе на кристаллах куприта. И в этом докладе прежде всего подчеркивается два механизма электропроводности — электронами и "дырками". При этом указывается, что для полупроводников с небольшим количеством примесей при низких температурах большая часть проводимости обуславливается электронами, которые прежде всего берутся с примесей. Остающиеся в этом случае положительные заряды локализованы на примесях и в переносе тока не участвуют. Наоборот, при высоких температурах, когда электроны берутся в основном из зоны занятых уровней, "дырки" в значительной степени участвуют в переносе электрических зарядов. Правда, необходимо отметить, что не все примеси действуют одинаково.

Для объяснения фотопроводимости куприта кроме основной полосы и полосы проводимости приходится допустить существование промежуточных уровней, связанных, по всей вероятности, с неоднородностями решетки. Выбрасыванию электронов с этих дополнительных уровней в зону проводимости соответствует добавочное поглощение в инфракрасной области.

Из явлений, наблюдаемых на купrite, отметим униполярность фототока и отрицательный фототок. При освещении куприя через полупрозрачный золотой электрод в кристалле наблюдается больший или меньший фототок в зависимости от того, является ли освещенный электрод катодом или анодом. При этом достаточно резко выраженная униполярность фототока проявляется лишь для сильно поглощаемого света. Ее можно объяснить тем, что во втором случае поле быстро убирает электроны из такого слоя кристалла, в котором происходит заметное поглощение света; в первом же случае фотоэлектроны создают повышенную концентрацию во всей толще кристалла. Отрицательный фототок — уменьшение проводимости при освещении — наблюдается в сильных электрических полях, если число фотоэлектронов мало по сравнению с числом темновых. Это явление можно объяснить следующим образом. Электроны, поднятые с основной полосы в зону проводимости, сильным полем уносятся из кристалла. Вследствие прои шедшего раздражения зарядов, увеличивается рекомбинация темновых электронов. Если число выпавших из строя темновых электронов больше числа возникших фотоэлектронов, то будет иметь место отрицательный фототок.

В своем следующем докладе А. Ф. Иоффе сообщил об исследовании кристаллического фотоэффекта на кристаллах куприта. При освещении кристалла куприта (через полупрозрачный электрод) поглощаемый в нем светом, между электродами возникает некоторая разность потенциалов. Ее можно подсчитать по формуле Тейхмана, если принять, что электродвижущая сила является следствием разных концентраций фотоэлектронов у одного и другого электрода. Докладчик показал, что в качественном отношении формула Тейхмана описывает кристаллический фотоэффект правильно. При этом в одном предельном случае — малого числа фотоэлектронов по сравнению с числом темновых — получается линейная зависимость

фотодиффузионной электродвижущей силы от  $\frac{T}{\sigma}$ , где  $\sigma$  электропроводность, отвечающая температуре  $T$ . В другом предельном случае большого числа фотоэлектронов по сравнению с числом темновых, она растет пропорционально  $T$ . В отношении зависимости фотоэлектродвижущей силы от интенсивности падающего света теория и опыт показывают линейность для первого предельного случая и более сложную зависимость, с насыщением, для второго (например при температуре жидкого воздуха). Основное допущение, которое приходится делать для объяснения наблюдаемых на куприре фактов, заключается в том, что фотоэлектроны не остаются в том месте кристалла, где они созданы, а рассасываются и по затемненным местам. Следовательно, в кристалле должны существовать какие-то электронные потоки, производящие это перемешивание.

Исходя из этого положения, можно было попытаться заменить отношение свободных электронов у одного и другого электрода отношением электропроводностей в соответствующих местах. Однако и в этом случае приходится констатировать, что для количественных расчетов формула Тейхмана мало пригодна. При этом наблюдаемые фотоэлектродвижущие силы всегда превышают вычисленные.

Интересный доклад был сделан И. К. Кикоиным на тему о новом фотомагнито-электрическом эффекте, открытом недавно им совместно с М. М. Носковым. Новый эффект заключается в следующем: если поместить пластинку из чистой поликристаллической зекиси меди в горизонтальное магнитное поле, направленное вдоль большой поверхности пластиинки, и осветить ее светом перпендикулярно магнитному полю, то между электродами, нанесенными на верхнюю и нижнюю грани, образуется большая разность потенциалов, достигающая при температуре жидкого воздуха 20 В. При комнатной температуре эффект очень мал. Наиболее интересный момент состоит в том, что поперечная разность потенциалов наблюдается в отсутствии макроскопического тока в пластинке. Возникающая фотомагнитная электродвижущая сила возрастает линейно с величиной магнитного поля и меняет свой знак при изменении направления поля. От интенсивности света она зависит мало, возрастаая сильно лишь при слабых интенсивностях. Наблюдаемые же фототоки при замкнутых поперечных электродах возрастают линейно с увеличением интенсивности падающего света.

Красный свет, в отличие от других, вызывает уменьшение эффекта; этим объясняется увеличение эффекта при помещении водяного фильтра на пути белого светового пучка, падающего на зекись меди. Для объяснения этого эффекта приходится допустить существование двух компенсирующих друг друга электрических потоков, которые различно отклоняются в магнитном поле. Были предложены два объяснения. В первом объяснении (Френкеля) роль компенсирующих потоков играют фотоэл. кристоны и "дырки", движущиеся в одном и том же направлении и отклоняющиеся в магнитном поле в разные стороны. В этом случае наблюдаемый эффект есть эффект суммарный. Во втором объяснении (А. Ф. Иоффе) роль компенсирующих потоков играют поток фотоэлектронов и компенсирующий его (обратного направления) поток темновых электронов. Потоки отклоняются в магнитном поле в разные стороны. При этом разная степень отклонения этих потоков основана на том, что идущий от освещенного места поток фотоэлектронов в среднем состоит из более быстрых электронов, по сравнению с темновыми. В этом случае эффект должен быть разностным.

В докладах, посвященных внутреннему фотoeffекту в диэлектриках, главным вопросом являлся вопрос об установлении энергетических электронных уровней в кристаллической решетке. Основной доклад по этому вопросу был сделан П. С. Тартаковским. Он изложил схему электронных уровней для каменной соли, построенную им на основании некоторых литературных данных и работ, выполненных в Сибирском физико-техническом институте (Томск).

Кроме основной энергетической полосы, откуда электроны берутся при окрашивании каменной соли ультрафиолетовыми или рентгеновыми лучами

и полосы проводимости, в схему помещены два промежуточных уровня. Один из них отвечает атому натрия (атомарный красящий центр). Другой проявляется в токе деполяризаций (плиты Калабухова и Фишелева) и в прохождении тока через соль при бомбардировке ее электронами (Фишелев). Из исследований внутреннего фотоэффекта в рентгенизированной каменной соли и изучения ее ультрафиолетовой флуоресценции при освещении видимым светом, установлено взаимное расположение этих уровней. На основании других опытов докладчика, установлено также расположение этих уровней относительно вершины потенциального барьера.

По последнему вопросу — о вентильном фотоэффекте и выпрямлении — акад. А. Г. Гольдман изложил предположенную им обобщенную теорию твердых фотоэлементов и выпрямителей, предсвляющую дальнейшее развитие взглядов Ауерса и Кершбаума. Докладчик исходил из зависимости сопротивления запорного слоя от напряжения. Вводя четыре константы, автор выводит основные закономерности явлений, протекающих в твердых фотоэлементах. Иллюстрирующий теорию экспериментальный материал былложен рядом его сотрудников. Однако для построения обобщенной теории нужно принять зависимость сопротивления запорного слоя не только от напряжения, но и от силы света, как это было отмечено А. Ф. Иоффе.

Существенной для понимания процессов, происходящих в твердых фотоэлементах и выпрямителях, является работа В. П. Жузе, доложенная на конференции А. Ф. Иоффе. Жузе наносил на пластинку закиси меди с одной стороны искусственные запорные слои из материалов большого удельного сопротивления, а с другой — металлические электроды без переходного сопротивления. Для исследования зависимости от толщины, запорный слой наносился в виде клина. На изолирующий клин наносился ряд маленьких золотых электродов (распылением в вакууме).

Опытами Жузе было установлено, что при нанесении запорного слоя из материалов, не обладающих фотопроводимостью (кварц,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , бакелит), получались элементы с выпрямительным действием, при полном отсутствии вентильного фотоэффекта. Величина коэффициента выпрямления зависит как от природы запорного слоя, так и от его толщины, достигая некоторого максимального значения при толщинах порядка нескольких единиц  $10^{-6}$  см. При нанесении запорного слоя из сернистого таллия, обладающего фотопроводимостью, получались элементы с фотоэлектрическими и выпрямительными свойствами. Отсюда можно заключить, что существенную роль в вентильном фотоэффекте играют фотоэлектрические свойства самого запорного слоя.

М. П. Бронштейн в своем докладе показал, как можно, по крайней мере качественно, объяснить опыты В. П. Жузе на основании квантово-механической модели полупроводника. В. Н. Лепешинская сообщила о работах, проводимых в Центральной радиолаборатории по селеновым фотоэлементам с запорным слоем.

В заключительном заседании А. Ф. Иоффе в своем последнем слове подчеркнул наиболее существенные моменты в работе конференции и отметил важнейшие вопросы, которыми необходимо заняться в первую очередь. На этом же заседании были рассмотрены организационные вопросы. Было избрано бюро Всесоюзной бригады по полупроводникам и распределены отдельные области работы по полупроводникам между институтами и лабораториями.

Следует отметить с большой благодарностью огромную работу коллектива Одесского физического института, проведенную им для обеспечения условий для плодотворной работы конференции.