

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

А. Ф. Иоффе

В 1927 г. появились первые твердые выпрямители переменного тока из закиси меди. Спустя короткое время обнаружилось, что аналогично изготовленные пластинки из закиси меди дают при освещении электрический ток. Эти факты привлекли внимание физиков к тем своеобразным свойствам полупроводников, которые являются первопричиной как этих явлений, так и ряда других, которые выявились в ходе исследований.

С этого же времени началось изучение полупроводников в Советском Союзе. Инициаторами этих исследований были К. Д. Синельников и И. В. Курчатов, а на Украине — А. Г. Гольдман. Систематическая работа по всестороннему исследованию полупроводников была поставлена в самом конце 20-х годов в Ленинградском физико-техническом институте и в Киеве в Институте физики Академии наук УССР. С самого начала теория и практика, физические лаборатории и заводы были тесно связаны. Это объединение осуществляли 7 съездов, собиравшихся в Ленинграде, Киеве и Одессе. В результате проведенных исследований улучшились и физическое понимание процессов в полупроводниках и производство твердых выпрямителей сначала из закиси меди, позже из селена. Б. В. Курчатовым и Ю. А. Дунаевым разработан был новый тип мощных выпрямителей из сернистой меди, которые выпрямляли на единицу площади в 100 раз более сильные токи, чем закисные и селеновые. Правда, энергетические потери в этих выпрямителях были несколько выше; кроме того, встречались трудности при их последовательном соединении в высоковольтные агрегаты.

Значительное развитие получили фотоэлементы. Ю. П. Маслаковец и Б. М. Коломиец в Ленинграде и т. Гейхман в Киеве создали новые типы элементов на основе сернистого таллия и сернистого серебра. На один люмен света электрической лампы эти фотоэлементы давали от 3000 до 10 000 микроампер, тогда как в фотоэлементах из закиси меди и селена токи не превышали 400 микроампер на люмен. На прямом солнечном свете можно было получать электроэнергию с коэффициентом полезного действия до 1% вместо 0,05% для существовавших тогда зарубежных приборов. Таким образом, впервые возник вопрос о солнечных генераторах электроэнергии.

Наряду с этими практическими выходами и в тесной связи с ними развивалась и исследовательская работа. Основной проблемой были свойства пограничного запорного слоя, вызывавшего выпрямление и фотоэлектродвижущую силу.

Важнейшие результаты довоенных работ советских физиков в этом направлении были: исследования В. П. Жузе искусственного запорного слоя из напыленной двуокиси кремния (кварца) на закиси меди; они позволили установить оптимальную толщину запорного слоя. Опыты Жузе имеют много общего с работами О. В. Лосева, наблюдавшего влияние

кварцевого слоя на карборунде. Лосев имеет также неоспоримые заслуги по применению полупроводников для детектирования и генерирования высокочастотных радиоволн.

Сделан был ряд попыток Б. И. Давыдовым, Д. И. Блохинцевым, С. И. Пекаром создать теорию запорного слоя. Среди них были и теории, сохранившие свое значение и в настоящее время, и даже зачатки идей, значение которых выяснилось только много позже.

Параллельно с теорией ставились и экспериментальные работы. А. В. Иоффе подтвердила на обширном материале опытных фактов справедливость диффузионной теории запорного слоя и в то же время ее недостаточность для количественных выводов. Оказалось, что хотя свойства запорного слоя на границе с металлом и приводят к выпрямлению, однако далеко не такого порядка, какой наблюдается в технических выпрямителях. А. В. Иоффе показала, что нужный масштаб выпрямления получается только на границе двух полупроводников с различным типом проводимости на границе полупроводников p - и n -типа. Этот вывод был затем подтвержден на примерах выпрямителей из селена и закиси меди и открыл пути к их усовершенствованию.

Именно эти граничные условия, перенесенные в ходе войны американскими физиками во внутрь монокристалла германия и кремния, положили начало новому этапу полупроводниковой радиотехники.

Крупным успехом советских физиков было открытие И. К. Кикоиным и М. М. Носковым фотомагнитного эффекта и данное И. К. Кикоиным правильное его объяснение. Исследование фотомагнитного эффекта и в настоящее время вызывает пристальный интерес физиков.

Большое значение и возрастающий интерес привлекают свойства возбужденных состояний кристалла — экситонов, открытых теоретически Я. И. Френкелем в 1931 г. и нашедших подтверждение и многочисленные применения в послевоенных работах советских физиков. Так, В. П. Жузе и С. М. Рывкин, а также В. Е. Лашкарев показали их роль как первичного акта фотоэффекта в полупроводниках. Е. Ф. Гроссу и Н. А. Каррыеву удалось обнаружить экситоны в спектрах поглощения закиси меди, а затем Е. Ф. Гросс с сотрудниками обобщил и уточнил эти результаты, создав новое направление в оптике твердого тела. Наконец, Е. Д. Девяткова и А. Ф. Иоффе смогли обосновать участие экситонов в переносе тепловой энергии, что доказывает способность экситонов диффундировать в основной решетке кристалла. А. И. Ансельм развил теорию их подвижности.

Не меньшее значение имеют введенные С. И. Пекаром по мысли академика Л. Д. Ландау поляроны — окруженные атмосферой диэлектрической поляризации свободные электроны в полупроводнике. Пределы применимости теории Пекара и критерии существования поляронов обсуждаются еще и в настоящее время, однако роль их в электрических свойствах ионных полупроводников несомненна. Развитие теории Пекара привело его к количественной теории окрашенных центров в щелочно-галлоидных кристаллах. Предсказания теории Пекара подтверждаются на опыте. Большие успехи в изучении связанного с этим фотографического процесса достигнуты Е. А. Кирилловым в Одессе. Новые факты обнаружили М. А. Савостьянова и С. А. Арцыбышев.

Обширная новая область знания была создана работами П. П. Кобеко и академика И. В. Курчатова по сегнетоэлектричеству или, как его называют на западе, по ферроэлектричеству.

Эти исследования получили большое практическое значение, когда Б. М. Вул и И. М. Гольдман открыли сегнетоэлектрические свойства титаната бария. Титанат бария сделался не только материалом для высоко-

частотных конденсаторов, но и обусловил новые возможности для воспроизведения звука. Еще далеко не исчерпаны обнаруженные Б. М. Вулом и А. В. Ржановым его возможности как пьезоэлектрика и обратимого преобразователя механической и электростатической энергии. Серию новейших сегнетоэлектриков с различными свойствами изготовил и изучил Г. А. Смоленский.

Учение о полупроводниках значительно обогатилось исследованиями А. Р. Регелем жидких полупроводников, доказавшими, что полупроводниковые свойства не связаны со строгой периодичностью структуры кристаллов и что решающим является ближний порядок, т. е. химические связи атома с ближайшими его соседями. Регель изучил также полупроводниковые процессы, протекающие в жидком состоянии. Н. А. Горюнова и Б. Т. Коломиец расширили область полупроводниковых материалов, создав серию стекловидных полупроводников.

Значительный вклад в учение о полупроводниках внесли исследования академика В. Е. Лашкарева и его сотрудников по амбиполярной диффузии зарядов, по фотоэффекту и по антизапорным слоям в полупроводниках.

Много нового дали исследования теплопроводности полупроводников, проведенные А. Ф. Иоффе, А. В. Иоффе, Е. Д. Девятковой, П. В. Гуляевым. Была установлена связь с атомным весом и характером химической связи, доля участия электронов в теплопроводности, роль биполярной диффузии. Теория последнего явления была развита еще в 1940 г. Б. И. Давыдовым и И. М. Шмукевичем. Изучение влияния посторонних примесей на теплопроводность и на подвижность электронов внесло существенные черты в понимание процессов рассеяния фононов и электронов. Детальное изучение примесей в теллуристом свинце привело Т. Л. Ковальчик и Ю. П. Маслаковца к более глубокому пониманию их взаимодействия с решеткой кристалла.

Новые черты в картину движения свободных зарядов в полупроводнике внесли исследования Л. С. Стильбанса и С. В. Айрапетянца. Оказалось, что нарушение периодичности в расположении положительных ионов в решетке кристалла резко снижает подвижность отрицательных электронов, не оказывая заметного влияния на движение положительных дырок, и, наоборот нарушение порядка для отрицательных ионов влияет только на подвижность дырок, не изменяя подвижности электронов.

Движение же фононов нарушается в равной степени искажением периодичности или внесением посторонних ионов любого знака. А. В. Иоффе и А. Ф. Иоффе показали, что относительное снижение теплопроводности $\frac{\Delta\kappa}{\kappa}$, вызванное внесением N посторонних атомов в среду

N_0 атомов решетки, определяется величиной $\frac{\Delta\kappa}{\kappa} = -\frac{N}{N_0} \frac{\lambda_0}{a} S$, где λ_0 — длина свободного пробега фононов в чистом веществе, a — постоянная решетки, а S — поперечное сечение рассеяния, выраженное в площадях элементарной ячейки. Оказалось также, что замена половины всех атомов данного типа другими снижает длину свободного пробега до атомных размеров, как в аморфных материалах.

Значительные результаты были получены С. Г. Калашниковым и Б. И. Болтаксом по вопросам диффузии растворимости и рекомбинации примесей в германии и Б. М. Вулом в его исследованиях механизма пробоя закороченных слоев.

Выдающимся событием в советской физике было открытие в 1942 г. Е. К. Завойским парамагнитного резонанса, теоретически предсказанного еще в 1923 г. Я. Г. Дорфманом. С тех пор парамагнитный резонанс

сделался одним из необходимейших средств изучения вещества. Наблюденный позже циклотронный резонанс был также заранее предсказан Я. Г. Дорфманом как диамагнитный резонанс.

Такое же большое значение получили поверхностные электронные уровни, введенные академиком И. Е. Таммом и С. П. Шубиным при рассмотрении фотоэлектрических явлений.

Новое направление в теории твердого тела представляет развиваемая С. В. Вонсовским теория, учитывающая взаимодействие электронов как одной неделимой системы.

Другое весьма перспективное направление в теоретической физике представляют работы А. Г. Самойловича и его сотрудников, исходящие из картины химических связей в кристалле, и из исследования магнитных и термоэлектрических свойств полупроводников.

Ф. Ф. Волькенштейн и С. З. Рогинский показали, что явление катализа во многих случаях обязано электронным процессам в поверхностном слое катализатора, и развили электронную теорию катализа, вызвавшую широкий интерес.

Самостоятельную область исследования советских физиков представляют собой термоэлектрические свойства полупроводников и основанные на них практические выходы.

Исследования эти начались задолго до Отечественной войны и к 1940 г. привели уже к возможности получения токов до 100 ампер и коэффициента полезного действия преобразования тепловой энергии в электрическую до 3%, что в десять раз превышало к. п. д. металлических термоэлементов. Теория термоэлектрических генераторов, холодильников и подогревателей была опубликована А. Ф. Иоффе в 1950 г. С тех пор группа физиков (Ю. П. Маслаковец, А. Н. Воронин, Л. С. Сильбанс и другие) развивала под руководством А. Ф. Иоффе как теорию полупроводниковых термоэлементов, так и их разнообразные применения. За 7 лет достигнуты значительные успехи и разработаны многочисленные термоэлектрические устройства, некоторые из которых перешли уже в производство.

Имеются основания считать, что в настоящее время уровень достигнутых в этом вопросе результатов превосходит то, что создано за рубежом.

Что касается важнейших в наше время радиотехнических применений полупроводников, то инициатива здесь принадлежала США. Советские физики сумели овладеть техникой германиевых радиоприборов и совместно с промышленностью поставить их производство. Это заслуга физиков Физико-технического института в Ленинграде, научных школ Б. М. Вула и С. Г. Калашникова в Москве и В. Е. Лашкарева в Киеве. Дальнейшее развитие перешло в руки отраслевых институтов, с которыми физики поддерживают постоянную связь. Приходится, однако, признать, что в производстве полупроводниковых радиоприборов советская промышленность все еще не достигла уровня США.

Значительно лучше обстоит дело с так называемыми термисторами или тепловыми сопротивлениями. Не только в лабораториях, но и в производстве имеются разработанные Б. Т. Коломийцем совместно с Шефтелем приборы, не уступающие по своей чувствительности и по устойчивости показаний лучшим зарубежным образцам. Наряду с ними поставлено производство фотосопротивлений, которые на ряде заводов применяются для целей автоматики производства, для предупреждения несчастных случаев и аварий.

В. Г. Карманов разработал образцы микротермисторов размером до долей миллиметра с малой теплоемкостью и в связи с этим с весьма коротким периодом установления. Микротермисторы с большим успехом

используются для измерения температуры листьев растений и кожи животных. Они позволяют записывать ход температуры во времени с запазданием меньше 1 сек. С их помощью обнаружены периодические процессы в жизни растений и новые черты в физиологии дыхания и транспирации.

А. Ф. Чудновский и М. А. Каганов создали на основе полупроводников большую серию измерительных приборов для сельскохозяйственных целей.

Е. А. Коленко и А. Н. Воронин применили полупроводниковые термозлементы для решения многих задач биологии, метеорологии, вакуумного производства, для стабилизации радиоаппаратуры, для повышения чувствительности приемников лучистой энергии, для снабжения электроэнергией радиоаппаратуры, для электрического освещения и для многих других целей.

В этом кратком обзоре я, разумеется, не мог даже коснуться многих сотен научных работ, выполненных в СССР по различным вопросам теории полупроводников, опытных исследований их свойств и тех применений, которые еще не получили практического осуществления. А среди последних имеются такие оригинальные и перспективные задачи, как полупроводниковый катализ в химических производствах, как мощные выпрямители на сотни и тысячи ампер, как солнечные генераторы электроэнергии на полупроводниковых термоэлектрических батареях, как термоэлектрические холодильники.

Рассматривая в целом научную работу, проделанную в Советском Союзе по проблеме полупроводников, можно отметить, что она развивалась высокими темпами, как и все стороны жизни нашей родины, построившей социализм и быстрыми шагами идущей к высшей форме человеческого общества — к коммунизму.

Одними из первых приступив к исследованию полупроводников, советские физики вплоть до начала Великой Отечественной войны шли в первых рядах мировой науки наряду с Германией. За этот период времени были выявлены: механизм выпрямления, структура запорного слоя, фотоэлектрические и термоэлектрические явления в полупроводниках, влияние сильных электрических полей, разработаны новые типы выпрямителей и фотоэлементов с высокими по тому времени показателями, созданы первые полупроводниковые термозлементы.

Великая Отечественная война Советского Союза против гитлеровских агрессоров и ее последствия приостановили развитие полупроводниковой тематики почти на десять лет. За эти годы основной центр исследований и применений полупроводников переместился в США. На первый план выдвинулась проблема германия и кремния как полупроводниковых материалов, в которых удалось осуществить $p-n$ переходы. С их помощью создавались приборы радиотехники — детекторы, усилители и генераторы высокочастотных колебаний. Они потребовали небывалой химической чистоты исходных материалов, новых методов технологии и новых приемов исследования. В решение этих задач советские физики включились значительно позже, когда германиевые приборы в США вошли уже в радиотехническую практику. Тем не менее при дружном участии физиков и инженеров были преодолены все трудности. Производство германия нужных качеств поставлено благодаря главным образом Н. П. Сажину и ряду физиков и химиков академических институтов. Мы все еще отстаем в производстве сверхчистого кремния и изделий из него.

Для оценки проделанной работы следует прежде всего указать, какое значение она имела для развития физики твердого тела и для

прогресса техники, каковы перспективы, открываемые нашими работами для ближайшего будущего.

С этих важнейших позиций можно с удовлетворением отметить тесную связь физических исследований с потребностями производства и положительную их роль в техническом прогрессе нашей промышленности. Следует указать на значительную роль теории в изучении полупроводников: свыше трех десятков представителей теоретической физики активно участвует в общей работе. Среди многих сотен опубликованных научных работ, посвященных полупроводникам, видное место занимают исследования основных проблем учения о твердом теле. Советские работы внесли новые черты в это учение, опровергли некоторые установившиеся уже взгляды. Важнейшие проблемы, определяющие физическую теорию полупроводников, если и не решены, то поставлены советскими физиками и успешно ими разрешаются. Успешно осуществляются также такие технические проблемы, как прямое превращение тепловой и лучистой энергии в электрическую, как получение холода без сложных машин, как новые эффективные средства катализа в химических производствах.

Проблема полупроводников возникла к десятилетию Великой Октябрьской социалистической революции и развивалась в условиях социалистического строительства и индустриализации страны. Зародившись в одном-двух институтах, изучение полупроводников охватывает уже в настоящее время десятки исследовательских институтов: в Ленинграде, Москве, Киеве, Одессе, Минске, Вильнюсе, Саратове, Махач-Кале и Баку, во Львове, Ростове, Казани, Горьком, Ташкенте и других городах.

Несколько специализированных заводов занято производством полупроводниковых материалов и изделий из них. Академия наук СССР и Ленинградский совет народного хозяйства приняли решения о всемерном развитии полупроводникового дела.

Все это можно рассматривать как благоприятные предпосылки дальнейшего прогресса в этой области, прогресса, который углубит наше понимание явлений природы и усилит нашу власть над ними. Успешное развитие наших усилий должно привести к революционным сдвигам в технике — к сдвигам, которые можно сравнить лишь с перспективами ядерной физики.
