

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### СОСТОЯНИЕ НАШИХ ЗНАНИЙ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ПРЕДСТОЯЩИЕ ЗАДАЧИ

*А. Ф. Иоффе*

Полупроводники — сравнительно «молодая» наука — ей нет ещё 30 лет. Она носит на себе черты нового времени. Нельзя не заметить, например, тесного взаимодействия физики и техники на всём протяжении её истории. Если не считать фотопроводимости селена, обнаруженной ещё в прошлом веке, и попыток её использования в первые годы 20-го столетия, то началом систематического изучения полупроводников можно считать 1927—1932 гг., когда появились выпрямители переменного тока и фотоэлементы из закиси меди. Эти технические выходы предопределили развитие физики полупроводников на ближайшее десятилетие. Закись меди стала основным объектом научных исследований, интерес которых был направлен на свойства запорных слоёв, обуславливающих как выпрямление, так и фотоэффект.

По мере того как появились новые применения: стабилизаторы напряжений, реле времени, полупроводниковые катоды, электролитические конденсаторы, расширялся фронт физических работ, изучались новые полупроводниковые материалы.

Селену и закиси меди посвящены тысячи печатных работ. В ходе войны 1939—1945 гг. появились высокочастотные выпрямители и усилители из германия и кремния. С тех пор внимание физиков переключилось на эти и аналогичные им полупроводники.

Другая черта, характеризующая прогрессивный путь развития полупроводников, — это тесная связь эксперимента с теорией. С самого начала в основу учения о полупроводниках положена была квантовая теория, получившая к тому времени значительное развитие в физике металлов. Если сначала подчёркивались черты сходства между теориями металлов и полупроводников и на полупроводники переносился весь технический аппарат теории металлов, то в последние годы всё большее значение приобретают свойства, отличающие их друг от друга.

Можно считать большой удачей, обусловившей успех полупроводников, что здоровый путь взаимосвязи физики и производства и сочетания теорий и опыта всё больше укреплялся по мере роста объёма и значения проблемы.

В настоящее время полупроводники — центральная проблема физики твёрдого тела, а их применение в технике становится основным путём решения задач радиотехники, автоматики и энергетики.

Свыше 10 000 работ в этой области опубликовано за последние 30 лет и число их растёт со всё возрастающей скоростью. Объём производства, использующего полупроводники, достиг уже масштабов важнейших разделов электротехники.

Всё это возлагает на нас обязанность внимательно рассмотреть сильные и слабые стороны современного состояния проблемы полупроводников и наметить пути дальнейшего прогресса.

Я не сомневаюсь, что мы не пожалеем усилий, чтобы оправдать большие надежды, возлагаемые на эту именно область знания. Полупроводники могут вскрыть природу процессов, протекающих в твёрдом теле, а овладев ими, мы поставим их на службу нашей основной задаче — построению коммунистического общества.

За пять лет произошли знаменательные сдвиги в нашей науке. И нигде, пожалуй, физика и техника не переплетались так тесно, как в области полупроводников.

На первый план выдвинулась проблема  $p-n$  переходов, и на этой основе возникли не только новые радиоприборы — диоды, триоды и генераторы радиоколебаний, но и новые виды выпрямителей переменного тока, фотоэлементов и источников тока, преобразующие энергию радиоактивного излучения.

Появились новые полупроводниковые материалы, которые внесли большую ясность в учение о полупроводниках и оказались гораздо более ценными объектами исследования, чем довоенные закись меди и селен. Внимание исследователей было привлечено к неравновесным процессам и к неосновным носителям тока.

Появились жидкие и стекловидные полупроводники, которые нарушили неразрывную, как казалось, связь полупроводников с кристаллами.

Наряду с ферромагнетиками появились полупроводниковые ферриты, наряду с изоляторами — титанаты бария, концентрирующие электрическую энергию и превращающие её в механическую.

Всё большее значение приобретают полупроводниковые термоэлементы как генераторы электроэнергии и как средства получения холода и тепла.

Выходят на сцену полупроводниковые катализаторы химических процессов и всё больше приближаются к нам люминофоры.

Хочется выделить в этом потоке научных и технических успехов участие нашей советской науки.

Идея и теория поляронов сделалась уже прочным завоеванием науки. Мы обязаны ею киевскому физику С. И. Пекару.

Предложенная 24 года тому назад покойным Я. И. Френкелем идея экситонов прошла сложный путь теоретического и экспериментального развития и представлена на настоящей конференции рядом докладов на нескольких секциях.

Открытые Е. К. Завойским явление парамагнитного резонанса и предсказанный Я. Г. Дорфманом циклотронный резонанс открыли новые пути проникновения в природу эффективной массы электронов и структуру энергетических уровней. Правда, основное развитие эти явления получили в США, а не в наших лабораториях.

В актив советской физики можно записать также развитие учения о фотоэлектричестве и фотоэлектродвижущих силах В. Е. Лашкаревым и его школой.

Титанаты бария Б. М. Вула и пьезоэлектрики из них оказали немалое влияние на развитие радиотехнических устройств.

Полупроводниковым катализаторам посвящена целая секция.

Изучение и применение полупроводниковых термоэлементов — дело рук (и не только рук, но и голов) советских физиков.

Я не стану перечислять другие немаловажные успехи науки о полупроводниках и те поразительные технические новшества, к которым она привела.

Интереснее и важнее отметить слабые стороны и наметить пути их устранения. Здесь я выскажу своё мнение, с которым быть может не все согласятся.

Теория полупроводников создавалась как развитие теории металлов, как её экстраполяция. Мне кажется, что в этой экстраполяции теория вышла далеко за пределы своей применимости. Проходя свободный путь от одного столкновения до другого, электрон движется с некоторой средней скоростью и ускорением, которое характеризует его эффективную массу. Но как быть, если длина пробега оказывается меньше длины волны, меньше межуатомных расстояний; о какой скорости может идти речь, если неопределённость в величине энергии в десятки раз превышает самую величину энергии. А таковы именно условия во многих полупроводниках.

Здесь неприменимы все привычные средства — не только аналогия с кинетической теорией газов, но и кинетическое уравнение, функция распределения скоростей и время релаксации. Циклотронный и парамагнитный резонансы также неприменимы к полупроводникам с небольшой длиной свободного пробега.

Не стоит ли перейти к вероятностям перехода из одного состояния в другое, из одного участка в соседний?

Квантовая теория полупроводников, понятие эффективной массы строится на периодических свойствах поля в кристалле. А как же жидкие, аморфные, стекловидные полупроводники? Они лишены теории, хотя они не хуже других полупроводников.

Опыт связывает свойства полупроводников с ближним порядком, теория — с дальним. Видимо это только участок теории, частный её случай, а не вся теория. Не следовало бы испытать другой подход, не предполагающий периодического поля, например взять за исходную точку теорию плазмы?

Нельзя считать выясненным вопрос о пределах допустимости замены многоэлектронной задачи одноэлектронной. Нет теории полупроводников с различными типами связи, с различной структурой периодического поля.

Идея экситонов была выдвинута Я. И. Френкелем для объяснения поглощения света без фотопроводимости. А данные Е. Ф. Гросса скорее говорят за прямую связь фоточувствительности с экситонами.

Немало и других недочётов в теории полупроводников: термоэлектродвижущие силы при низких температурах, ход подвижности с температурой плохо согласуются с теорией, в особенности там, где подвижность мала. Эта критика теории со стороны потребителей. Перейду к самокритике экспериментатора.

Ещё больше провалов в опытах данных.

Основой полупроводника являются действующие в нём силы связи, которые прежде всего проявляются в прочности, в сдвигах, а о механических свойствах полупроводников физики забыли и на конференции нет ни одного доклада на эту тему. Всю проблему прочности мы сдали металловедам!

Источником, освобождающим заряды, и препятствием, рассеивающим их, является тепловое движение атомов. А кто им интересуется? Только мой доклад о теплопроводности прямо связан с тепловым движением.

Что мы знаем о молекулярных, о дипольных решётках, сколько типов полупроводников ещё не изучено? Поразительно, что столь обещающая область, как тугоплавкие полупроводники, совсем не исследована.

Как мало мы ещё знаем о связи физических свойств с ближним порядком, с характером химических сил, со структурой.

Слишком мало работ в области низких температур, когда тепловой фон отступает на задний план и выступают важнейшие квантовые свойства вещества. Лучший пример значения таких исследований — циклотронный резонанс, который впервые дал полную количественную теорию эффективных масс.

Много общих слов, но слишком мало конкретных исследований посвящено различным типам искажений и примесей.

Существующая теоретическая и экспериментальная базы недостаточны для всестороннего развития полупроводниковой техники.

Перспективы применений полупроводников поистине грандиозны.

В области энергетики перед нами задача использования громадных количеств тепла, пропадающих бесцельно в топках, в тепло-

вых машинах, в металлургических печах, в естественных условиях, несмотря на наличие значительного перепада температур.

Простота полупроводниковых термоэлементов ставит на очередь использование всех видов топлива и, в первую очередь, солнечных лучей, доставляющих на землю за одни сутки столько же энергии, сколько её заключено во всех запасах угля и нефти вместе взятых.

Велики перспективы фотоэлементов, сегнетоэлектриков как преобразователей энергии и ферритов, как средства концентрации высокочастотной магнитной энергии.

Нет сомнения, что полупроводники займут видное место в разрешении проблемы тепла и холода.

Ни в ком уже не возбуждает сомнения прогрессивная роль полупроводников в радиотехнике, в автоматике, телеуправлении и телевидении, несмотря на то, что полупроводниковым диодам, триодам и генераторам ещё нет и 10 лет от роду.

Количественные преимущества в габаритах, прочности, в потреблении электроэнергии, в дешевизне и массовости изготовления перерастают здесь в качественно новые возможности.

Несобходима ещё большая и дружная работа физиков, химиков, геологов и инженеров, чтобы претворить в реальные достижения богатейшие возможности, заложенные в полупроводниках.

---