

мической чистоты материалов и препаратов. Если очистка материалов до сотых долей процента считалась раньше пределом, то теперь речь идет о миллионных долях, а иногда и миллиардных долях процента.

Советские ученые и инженеры-химики знают, как осуществлять эти требования, но для этого необходимы соответствующие условия производства — абсолютная чистота заводских помещений, строгая регулировка температур и т. п., не говоря уже об особом техническом оснащении. В полупроводниковых лабораториях и на заводах, изготовляющих, например, приборы из кремния, не допускается присутствие других материалов и металлов. Даже в воздухе этих помещений не должно быть следов никаких иных посторонних элементов, кроме кремния.

Следовательно, полупроводниковые лаборатории и заводы должны быть не только обеспечены соответствующими производственными площадями и хорошо оборудованы, но в них необходима как неперемное условие высокая производственная культура.

Полупроводники — дело чрезвычайно тонкое. Зато эта область науки и техники открывает новые пути в радиотехнике и энергетике, несет с собой небывалые возможности облегчить и украсить быт советского человека.

Развитие науки и техники полупроводников — важнейшее государственное дело, выдвигаемое семилетним планом. Советские ученые и инженеры приложат все свои силы, чтобы наша страна заняла достойное место в мировом соревновании с капитализмом и в этой многообещающей области человеческой деятельности.

## НОВЫЕ ПУТИ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ\*

В прошлом году отмечалось десятилетие изобретения транзисторов, которые наложили свою печать на все учение о полупроводниках. Изучение действительно чистого германия, его аналогов и  $p-n$  переходов открыло широ-

\* Статья опубликована в журнале: Вестн. АН СССР, 1960, № 12, с. 11, т. е. спустя два месяца после кончины А. Ф. Иоффе (14 октября 1960 г.). Она представляет собой текст выступления А. Ф. Иоффе 29 августа 1960 г. на конференции по физике полупроводников в Чехословакии.

кую перспективу для исследований и впервые привело к количественному согласию эксперимента с теорией. Но было бы преувеличением считать, что мы овладели физикой всех полупроводников с удельными сопротивлениями от  $10^{-4}$  до  $10^{-10}$  Ом·см, подвижностями от  $10^{-2}$  до  $10^6$  см<sup>2</sup>/В·с, при температурах вплоть до 4000° и давлении до  $10^6$  атм. Мы еще далеки от всестороннего познания свойств даже твердых, а тем более жидких и газообразных полупроводников.

Области использования полупроводников непрерывно расширяются; наступающее десятилетие выдвигает, видимо, задачи энергетического характера с применением новых материалов и изучением их новых свойств. В качестве примера постараюсь назвать задачи, вытекающие из проблемы термоэлектричества.

Прежде всего, в противоположность простым монокристаллам радиотехники в области термоэлектричества исследуются сложные соединения, и, следовательно, возникает проблема взаимосвязи физических свойств с кристаллохимической структурой. Иными словами, физика полупроводников сближается здесь с химией. Предстоит выяснить, на какой химической основе возникают сложные структуры зон, чем определяются большие значения эффективных масс, которые нужны для хороших термоэлементов. Далее, изучение термоэлементов приводит нас к необходимости применения высоких температур. Действительно, переход от 600 к 120 К при тех же значениях  $Z = 1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{T^2}$  поднимает их кпд от 6—10 до 15—24 %, а в перспективе при температурах порядка 2000°С намечается заманчивая величина кпд — порядка 50 %.

При высоких температурах изобилие фононов перекрывает влияние отдельных дефектов структуры. Длины свободных пробегов как электронов, так и фононов снижаются до таких пределов, когда представление об этих параметрах теряет физический смысл, периодичность кристалла отступает на задний план и по своим свойствам он приближается к свойствам жидкости. А сколько нового таят в себе сами жидкие полупроводники, изучение которых тормозилось предрассудком о невозможности их существования, поскольку вся теория полупроводников исходит из периодического поля! Мы склонны, например, ожидать, что длины пробегов в жидкости будут близки к атомным, в то время как опыт приводит к большим

подвижностям, а следовательно, и длинам пробегов. Можно было бы также ожидать падения электропроводности после плавления, тогда как она повышается.

Экспоненциальный рост концентрации свободных зарядов в жидких полупроводниках, рост концентрации с отклонением от стехиометрического состава — все это напоминает зоны твердых полупроводников.

Металлы и сплавы, которые, казалось бы, потеряли свое значение для термоэлементов, при низких температурах вновь привлекают внимание.

Наконец, выдвигается проблема газообразных, частично ионизованных полупроводников, отличающихся от твердых лишь отсутствием расщепления валентной зоны.

С переходом к высоким температурам все большее значение приобретают процессы диффузии и характер примесей. Приходится также тщательно изучать влияние упругой и пластической деформации, термические напряжения и тепловое расширение материалов.

Следующая проблема, которая возникает при изучении термоэлементов, — это граница двух полупроводников. Она гораздо многообразнее, чем частный случай  $p-n$  переходов внутри монокристалла, по обе стороны которых имеется одинаковая исходная среда. На границе или на резком градиенте физических свойств возникают сложные условия взаимодействия двух тел, отличающихся по контактному потенциалам, по ширине и структуре зон, по типу проводимости. Контактные потенциалы полупроводников в отличие от металлов зависят от смещения химического потенциала при введении примесей. От коммутации на границе двух ветвей термоэлемента требуется полное отсутствие сопротивления для носителей тока и в то же время возможно высокий запрет диффузии.

Первостепенное значение для термоэлементов имеет теплопроводность. Ведь термоэлемент — это в основном прибор, где 80% тепла переходит от горячего края к холодному и только остаток в генераторах превращается в электрическую энергию, а в холодильниках переносится от холодного края к горячему.

Приступая же к детальному изучению проблемы теплопроводности, мы прежде всего сталкиваемся с вопросом о длине свободного пробега фононов, а она зависит от степени ангармоничности тепловых колебаний, от условий переброса между акустической и оптической их ветвями и от нарушения периодичности решетки.

На первый взгляд формула Дебая и Пайерлса весьма проста: наряду с длиной пробега, она включает лишь теплоемкость и скорость звука. Однако речь идет о групповой скорости фононов, а не о фазовой скорости ультразвука, которая сравнительно легко измеряется. Чтобы определить групповую скорость, приходится измерять спектры тепловых колебаний и зависимость их частоты от квазимпульса. До последнего времени эти данные можно было получить лишь путем вычисления, причем, как оказалось, они были совершенно не верны. Только недавно с помощью нейтронного анализа удалось получить эти данные для германия и кремния. Расхождение средней групповой со средней фазовой скоростью фононов получилось примерно пятикратным. Поэтому попытки предсказать величину теплопроводности были обречены на неудачу.

Одновременно при отборе термоэлектрических материалов необходимо было оценить их теплопроводность и ее зависимость от внешних параметров, атомного веса, степени ионности химических связей, теплового расширения и т. п. Важное значение имеет соотношение теплопроводности и подвижности в твердых сплавах, вошедших в практику термоэлементов. Возник вопрос о зависимости эффективной массы от температуры и других факторов.

Наконец, сильно усложнился вопрос о переносимой зарядами теплопроводности, в которой, помимо условия, вытекающего из закона Видемана—Франца, играет роль диффузия пар, а также о переносе тепла фотонами инфракрасного излучения.

Я назвал только несколько физических проблем, связанных с термоэлектричеством. Но ведь, помимо термоэлементов, могут возникнуть и другие применения полупроводников.

Своеобразие механических свойств полупроводников и явлений на их границах приведет, по-видимому, к важным техническим выходам. Вместе с тем проявятся еще не изученные стороны в полупроводниках, а интерес исследователей привлекут заброшенные пока материалы.

Среди других вопросов назову коллективные процессы в сегнетоэлектриках и ферритах. В связи с этим хочется вспомнить моих покойных друзей — И. В. Курчатова и П. П. Кобеко, которые выяснили физическую природу сегнетоэлектричества. Здесь возникают новые возможности концентрации электромагнитной энергии.

Немаловажное значение приобретают и экситоны, введенные в науку еще одним моим покойным другом — Я. И. Френкелем.

Не сомневаюсь, что дальнейшее развитие этих вопросов расширит и углубит наше понимание полупроводников. Первые 30 лет их истории дали уже богатые плоды. Радиотехника и измерительная техника достигли в выпускаемых приборах небывалой тонкости и многообразия. Созданы основы автоматики и телеуправления, выпрямления токов и фотоэлементов. Все это было связано с использованием  $p-n$  переходов. А далее уже открыты пути взаимных превращений гепловой, электрической, упругой, магнитной энергий. Осуществляется мечта овладения энергией Солнца. Это результаты дружной, настойчивой работы, в которой принимают участие ученые как США, Англии, Франции, ФРГ, так и СССР, Чехословакии, Польши и Китайской Народной Республики.

Наши конференции каждые два года подводят итоги тому, что сделано за это время, и объединяют усилия физиков. Но все, что мы сделали, — только начало длинного пути.

## ПОЛУПРОВОДНИКИ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС\*

Развитие техники выдвигает все новые задачи, для решения которых требуются новые материалы. Так, развитие авиации привело к разработке легких сплавов, прогресс ракетостроения — к созданию тугоплавких и огнестойких материалов и т. п.

Наше время отмечено пластмассами и полупроводниками, которые подняли новые пласты технической целины.

До недавнего времени электротехника знала медь и изоляторы, машиностроение — железо, радиотехника строилась на вакуумных лампах. Всего 30 лет назад на техническом горизонте появились полупроводники — сначала как выпрямители переменного тока и фотоэлементы. С тех пор они широкой волной вторглись в радиотехнику, автоматику и сигнализацию, измерительную технику.

\* Статья опубликована в журнале: Вестн. АН СССР, 1960, № 11, с. 25—27. Это — первая посмертная публикация А. Ф. Иоффе.