

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ *

Нет надобности ломиться в открытую дверь и разъяснять значение проблемы полупроводников. Оно достаточно известно. Но этой проблеме свойственно определенное своеобразие, из чего следуют, как мне кажется, серьезные выводы.

Прежде всего, проблему полупроводников нельзя считать только физической — она в одинаковой степени охватывает и химию, и кристаллографию, и технику. Исследования в области полупроводников имеют выходы в радиотехнику, электротехнику, автоматику, приборостроение, энергетику, холодильную технику и т. д.

В современной физике проблема полупроводников занимает основное, решающее место в теории твердого тела и конденсированных систем. Однако теоретические основы этой проблемы часто не соответствуют громадному опытному материалу. Отмечу только две трудности, наличие которых не может вызывать сомнения.

Первая — вопрос о характере движения электронов в полупроводнике. Согласно современной теории, в полупроводнике имеется некоторое количество электронов, которые находятся в особом свободном состоянии и движутся подобно молекулам газа, свободно проходя определенные пути. Встречая те или иные серьезные нарушения правильности кристалла, они рассеиваются, после чего движутся в другом направлении, снова встречают какой-то дефект кристалла и вновь рассеиваются.

Исходя из этой картины построена современная теория полупроводников. Но если подсчитать длину пути, который проходят электроны, то часто оказывается, что аналогия с газом не имеет смысла. Среди громадного многообразия полупроводников — от металлов с электропроводностью в 10^5 до изоляторов с электропроводностью 10^{-10} — немало таких, для которых пути свободного движения электронов (от одного столкновения до другого) меньше, чем межатомные расстояния, чем длина волны электронов. Хорошо известно, что о путях движения электронов на протяжении, меньшем длины их волны, нельзя

* Статья опубликована в журнале: Вестн. АН СССР, 1957, № 8, с. 15—20.

и говорить, так как понятия скорости и направления движения не имеют в данном случае смысла. Поскольку основное понятие средней скорости движения электронов также лишается реального содержания, то и вся теория, определяющая эти скорости, не может пайти применения.

Другая сторона вопроса заключается в том, что существующая теория, которая на протяжении 30-летней истории полупроводников дала много полезных и важных результатов и хорошо описала ряд явлений, построена только на одном свойстве кристаллов — периодичности их структуры — и не учитывает свойства периодически повторяющейся элементарной ячейки кристалла.

Таким образом, теория рассматривает только какое-то периодическое поле, и это оказывается уже достаточным для получения ряда результатов, хорошо совпадающих с опытом. Но ясно, что индивидуальные свойства конкретного полупроводника определяются именно тем физическим строением ячейки, которая периодически повторяется.

Чтобы описать полупроводник и предсказать его свойства, важно знать, как построена ячейка, какие силы связывают образующие ее атомы в кристаллическую решетку. Суть заключается в свойствах химических связей, а не в том, что эти связи многократно повторяются. Опыты А. Р. Регеля показали, что, потеряв периодичность дальнего порядка при плавлении, полупроводник сохраняет все свои свойства. Значит, не в периодичности было дело! Оказалось, что свойства полупроводника целиком зависят не от дальнего, а от ближнего порядка, т. е. от расположения ближайших соседних атомов.

Полупроводник можно определить как пространственный полимер с насыщенными химическими связями. Если связи не насыщены, — это металл. Поэтому существенное свойство полупроводника — химические связи в каждой отдельной ячейке. Различие между молекулой и ячейкой полупроводника сводится к их огранению. В случае отдельной молекулы должно быть соблюдено требование, чтобы поле, создаваемое этой молекулой, в бесконечности обращалось в нуль. В кристаллическом или некристаллическом проводнике это должно соблюдаться по отношению к границе каждой ячейки. Поскольку справа и слева от нее условия симметричны, на самой границе силы равны нулю. Разница, таким образом,

только в иных краевых условиях, существо же одинаково.

Мне представляется поэтому, что теория полупроводников — это химическая физика твердого тела. Основное свойство полупроводников, определяющее их поведение и их применения в тех или иных условиях, — это проблема химических связей, или, если говорить языком физики, проблема плотности распределения электрического заряда в пределах каждой данной ячейки.

Итак, для дальнейшего развития теории полупроводников решающим является ее поворот в сторону химии. Если химики преодолеют свою недооценку квантовых представлений, которая мне кажется явным недоразумением, то проблема полупроводников станет новым звеном, связывающим физику и химию, наряду с физической химией и химической физикой, оформившимися раньше. Не стану касаться других, кстати сказать, немногочисленных, противоречий современной теории полупроводников, но и из сказанного уже можно увидеть, насколько необходимо уделять внимание основам этой теории. При этом следует добиваться такого ее развития, чтобы она давала не только качественную оценку, но и позволяла количественно определять свойства того или иного полупроводника исходя из химических связей, из распределения электрического заряда в пределах отдельной кристаллографической ячейки. Теория должна также охватить всю область полупроводников — как кристаллических, так и аморфных.

Второе своеобразие проблемы полупроводников, которое она, впрочем, разделяет и с некоторыми другими, в особенности с проблемой атомного ядра, — тесная связь теории и эксперимента. Бессмысленно ставить опыты, не освещенные теорией, не связанные с техническими применениями, — можно потонуть в безграничном многообразии материалов. Полупроводников такое количество и такое разнообразие, что если не иметь в виду решения какой-либо определенной проблемы или получения определенных технических применений, можно провести тысячи работ, которые мало кому будут нужны.

Под техническими применениями нельзя понимать только то, что уже используется в технике. В области полупроводников, где с каждым месяцем появляются все новые и новые технические применения, основное направление исследования — изыскание путей лучшего решения

задач техники. Чтобы не быть голословным, приведу один пример.

Центральное место в проблеме полупроводников занимает изучение так называемых $p-n$ переходов, т. е. границы, где свободные заряды имеют отрицательный и положительный знак. Это — отрицательные электроны и положительные дырки. На границе происходит ряд своеобразных, технически важных явлений. Если направление тока таково, что дырки и электроны идут навстречу друг другу, они рекомбинируют и дают сильный ток. При противоположном направлении они расходятся и ток становится слабым. Это приводит к выпрямлению переменного тока, к резкой зависимости силы тока от направления.

Описанное явление было у нас известно еще до войны. Если сложить дырочный полупроводник с электронным, то при одном направлении тока получается большая электропроводимость, при другом — малая. Однако к практическим результатам такой опыт не привел, поскольку контакт двух соприкасающихся тел уже сам по себе создает большое сопротивление. Громадный успех был достигнут, когда границу удалось перенести внутрь монокристалла, одна часть которого обладала электронной, другая — дырочной проводимостью. В результате контактное сопротивление исчезло. Но этот успех повлек за собой новые трудности, с которыми мы пока полностью не справились.

Для создания внутри одного и того же кристалла дырочной и электронной частей сам кристалл должен быть необычайно чистым, с настолько малым количеством примесей, чтобы ничтожная добавка одного типа примесей делала его электронным, а ничтожная добавка других — дырочным. Сравнительно недавно это удалось сделать с германием. Здесь большая заслуга принадлежит академическим институтам, которые быстро нашли пути создания чистого германия. Однако пока мы еще не смогли так же хорошо решить задачу в отношении другого перспективного элемента — кремния; работа в этом направлении продолжается.

Возникает вопрос: нельзя ли вернуться к первоначальному решению — создать границу не внутри проводника, что вызывает такие большие трудности, а между двумя полупроводниками, но устранить те отрицательные стороны контактного сопротивления, поглощения, рассеяния зарядов по границе, которые не были преодолены?

Следовательно, физическое исследование, направленное на решение задачи выпрямления тока, должно идти не только по линии изготовления чистого кремния, но и по линии разработки таких новых методов, при которых можно было бы использовать границу двух разных полупроводников, предварительно тщательно изучив их поверхностные свойства на основе квантовой теории. Иными словами, должна быть обеспечена теснейшая связь квантовой теории твердого тела, эксперимента и технических выходов. Вряд ли где-нибудь, кроме ядерной физики, эти три стороны задачи так тесно связаны между собой, как в проблеме полупроводников. Отсутствие одной из них делает малоперспективной всю работу.

Проблему полупроводников и проблему ядерной энергии в известной степени роднит также необходимость использования мощных технических средств. Достаточно сказать, что степень химической чистоты веществ при работе с полупроводниками совершенно иного масштаба, чем во всех других областях химии. Если обыкновенно сотые, тысячные доли процента являются пределом требуемой очистки, то здесь нужна чистота порядка 10^{-6} — 10^{-9} , которая раньше никогда не достигалась. Это предъявляет серьезнейшие требования к аналитической химии и металлургии, потому что такие вещества должны производиться отнюдь не в микроскопических количествах — они должны служить основой большой техники. Затем если пытаться решить задачу полупроводников с точки зрения химических связей, то выясняется, что она требует большого математического аппарата и, вероятно, не разрешима без электронно-счетных машин. Путь-то ясен: от зарядов можно перейти к электрическим полям, а затем к силам и энергетическим уровням, но количество вычислительной работы невероятно велико.

Кроме этих двух обстоятельств — необходимости невиданной до сих пор химической чистоты и сложности расчетов, для которых нужна иная техника вычислений, следует отметить еще температурный фактор. Громадное влияние температуры на полупроводники обуславливает их технические применения, поэтому требуется проведение исследований при весьма низких температурах, когда тепловое движение не затемняет основных квантовых свойств, и при весьма высоких температурах. Хорошая криогенная лаборатория, высокотемпературные печи совершенно необходимы для исследования полупроводни-

ков. Точно так же необходима механическая лаборатория, потому что проследить виды связей, существующие в полупроводниках, можно лучше всего при изучении их механических свойств.

Несколько отвлекаясь от вопросов постановки исследований в области полупроводников, коротко остановлюсь на том направлении, которым занимаюсь уже много лет. Это энергетические применения полупроводников при помощи термоэлементов. За последние годы нам удалось до известной степени повысить качество термоэлементов; сначала мы создали их теорию, а потом, пытаясь осуществлять предсказания этой теории, получили полупроводниковые термоэлементы. В настоящее время они лучше зарубежных. При помощи таких, хотя далеко еще не совершенных, но уже достаточных для некоторых целей полупроводниковых термоэлементов можно решать многие задачи. Например, изготавливаются источники энергии для радиоприемников и для радиостанций, разработана батарея для использования выхлопных газов трактора взамен динамо-машины и др.

Еще более многочисленны применения термоэлементов для охлаждения. Сейчас максимальное охлаждение, которое может дать один наш термоэлемент, составляет около -70°C . Для сравнения отмечу, что, по имеющимся сведениям, термоэлементы в Америке и в Англии дают до -40° , а во Франции до -35°C .

На основе наших термоэлементов можно изготавливать бытовые холодильники, которые будут достаточно выгодными для самолетов ТУ-104, где они уже испытаны. Такого же типа холодильники разрабатываются для железнодорожного транспорта. Можно указать на применение термоэлементов в медицинской, биологической практике. Для получения срезов на микротоме надо иметь вполне определенную температуру: слишком высокая температура делает препарат пластичным — он не режется, а при низкой температуре — крошится. Оказалось возможным при помощи нескольких термоэлементов поддерживать препарат при той температуре, которая является оптимальной для получения срезов. Сейчас промышленностью изготавливается 2500 таких микротомов. Удалось осуществить автоматический пульс температуры. Термоэлемент позволяет держать определенный участок воды всегда на границе жидкой и твердой фаз. Как только вода тает, термоэлемент ее замораживает; когда она замерзает, тер-

моэлемент ее подогревает; благодаря этому температура поддерживается точно на нуле.

Не стану перечислять всех возможных применений. В альбоме Института полупроводников имеется около 15 осуществленных решений в самых различных областях, в том числе термостатирование радиоаппаратуры, позволяющее вместо кремния, выдерживающего высокую температуру, пользоваться германием, поместив его в сосуд, в котором поддерживается температура 30°C с точностью 0.1° при внешней температуре от -59 до $+80^{\circ}\text{C}$. Можно разработать еще десятки других изделий. Приведу несколько неожиданный на первый взгляд пример. Казалось бы, что общего с проблемой полупроводников имеет задача выведения породистого скота? А между тем она решается при помощи простого приема: изготавливаются термостаты, в которые помещается сперма производителей — быков; ее развозят по совхозам и колхозам, а температура ее поддерживается на таком уровне, что она сохраняет свою активность в течение длительного времени.

Исследования по проблеме полупроводников предъявляют своеобразные требования к кадрам научных работников. Прежде всего, они должны владеть квантовой механикой, ибо в противном случае вряд ли можно рассчитывать на успешную работу в области полупроводников. Далее, эта работа требует знания химии. Умение разбираться в вопросах тонкой металлургии и технологии также чрезвычайно важно. Соотношение между работниками различной специализации, которые составляли бы действительно полный коллектив, способный взяться за проблему полупроводников, должно быть примерно такое: из 100 человек — 20 теоретиков, 40 экспериментаторов, 20 химиков и 20 инженеров. Конечно, эти цифры нельзя рассматривать как что-то определенное, но во всяком случае все четыре стороны должны совмещаться и взаимно оплодотворять друг друга. Можно рассчитывать, что в результате совместной работы в такого рода коллективе вырастут исследователи, способные охватить всю проблему в целом.

Для успеха работы в области полупроводников необходима литература. Мы начинаем издавать довольно большую серию популярной литературы по каждому из технических направлений, а по физике и основным вопросам теории — серию монографий. Можно надеяться, что дело идет по правильному пути.

Организация научной работы в масштабе не только Академии наук СССР, но и республиканских академий, особенно Академии наук УССР, где находится сильный центр исследования полупроводников, осуществляется специальной Комиссией по полупроводникам при Президиуме Академии наук СССР. Вся проблема разбита на 15 отдельных разделов, по каждому разделу указан ведущий институт, ответственный за его разработку, и перечислены институты, которые участвуют в исследованиях. Среди ведущих — Институт полупроводников, Физический институт им. П. Н. Лебедева, Институт радиотехники и электроники, Институт физики металлов Уральского филиала Академии наук СССР, Институт физики в Киеве. Комиссия наметила и проводит узкие конференции по каждому разделу.

Вопросы организации исследований в области полупроводников обсуждались не так давно пленумом Комиссии и бюро Отделения физико-математических наук. И Комиссией, и Отделением предложен ряд мер для ликвидации имеющихся сейчас недостатков в работе по полупроводникам.

Настоятельно необходимо прежде всего обеспечить углубление и развитие теории полупроводников как центрального участка теории твердого тела, расширение экспериментальных исследований, улучшение существующих и разработку новых применений полупроводников, особенно в радиотехнике и электронике, автоматике и приборостроении, энергетике и холодильной технике. В течение шестой пятилетки нужно организовать ряд новых институтов с полупроводниковой тематикой, оборудовать эти и существующие институты и лаборатории современными приборами и установками, расширить тематику исследований, наладить теснейшую связь академических институтов с отраслевыми путем организации объединенных бригад, консультаций и передачи опыта, создать опытные заводы, конструкторские бюро и заводские лаборатории для разработки совместно с академическими институтами технологии и конструкции полупроводниковых устройств и изготовления первых их серий.

Большое значение имело бы командирование наших физиков, главным образом теоретиков, за границу для слушания курсов, которые будут читать крупнейшие ученые Америки, Англии, Франции и Италии. Командиро-

важные за рубежом молодые ученые смогут ознакомиться не только с тем, что делается в той или иной лаборатории, но и с основными идеями наших коллег в других странах.

МЕЧТА? НЕТ — БЛИЗКАЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ*

В решениях XXI съезда КПСС полупроводники, наряду с другими областями передовой техники, характеризуются как одно из ведущих средств технического прогресса в семилетнем плане. И это совершенно правильно. Нас, работников этого фронта науки и техники, решения съезда вдохновляют на достижение новых успехов, которые послужат нашим вкладом в выполнение величественных задач развернутого строительства коммунизма.

Полупроводники — одна из самых молодых отраслей науки и техники. Наиболее известны полупроводниковые приборы радиотехники. Полвека назад появились вакуумные лампы, которые внесли перелом в радиотехнику и обусловили ее бурное развитие. Теперь аналогичную роль играют полупроводники. Новые миниатюрные приборы в десятки раз меньше по своим размерам, чем радиолампы. Они потребляют во много раз меньше электроэнергии, не требуют предварительного накала и мгновенно вступают в действие, не боятся ударов и сотрясений. Все эти преимущества и ряд других открывают новые возможности перед радиотехникой и электроникой. Решительно облегчается построение электронно-счетных машин, которым предстоит громадное будущее.

Такие же приборы превращают энергию солнечных лучей в электрическую. Уже более девяти месяцев полупроводниковые фотоэлементы снабжают энергией наш третий искусственный спутник Земли. Полупроводниковые выпрямители превращают переменный ток в постоянный почти без потерь энергии и открывают реальные возможности для электрификации транспорта, для передачи энергии на большие расстояния. Полупроводниковые приборы используются в измерительной технике, автоматике, сигнализации, технике безопасности.

Уже только одних этих областей практического применения полупроводников было бы достаточно, чтобы обес-

* Статья опубликована в газете: Правда, 1959, 1 марта.