

М.Г. Мнелян

# СВЕРХ·

ПРОВОДНИКИ

---

В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

---



**М.Г.Мнеян**

---

**СВЕРХПРОВОДНИКИ  
В СОВРЕМЕННОМ  
МИРЕ**

М.Г.Мнеян

---

# СВЕРХ· ПРОВОДНИКИ

---

В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Книга для учащихся

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991

ББК 31.232  
М73

Рецензенты: заведующий лабораторией сверхпроводимости физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР А. И. Головашкин, доктор физико-математических наук, профессор ФИАН И. Н. Компанец

**Мнеян М. Г.**

**М73** Сверхпроводники в современном мире: Кн. для учащихся.— М.: Просвещение, 1991.— 159 с.: ил.— ISBN 5-09-001845-6.

В книге в интересной и популярной форме рассказывается о сверхпроводниках. В ней рассматриваются основные положения современной теории твердого тела, физические основы явления сверхпроводимости, принципы работы сверхпроводящих устройств и элементов, применяемых в энергетике, электронике, космосе, рассказывается о наиболее интересных и перспективных направлениях этого раздела физики.

Книга адресована учащимся старших классов.

М  $\frac{4306020000-489}{103(03) - 91}$  239—90 (заказ по КБ—11—1991)

ББК 31.232

ISBN 5-09-001845-6

© Мнеян М. Г., 1991

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Когда древнегреческие мыслители еще только удивлялись «силе, таящейся в янтаре и в магнитном камне», прирученный огонь уже светил, грел, обжигал и плавил металл. Работающая теплота на многие тысячелетия обогнала работающие электричество и магнетизм. От завоеванного и прирученного огня человек перешел к холоду. Произошло это совсем недавно, но созданный им рукотворный холод уже нашел себе немало применений. Логика развития техники привела к тому, что в странный мир самых низких в природе температур начали опускать не только физические приборы, бесстрастно регистрирующие происходящее, но и целые технические устройства. Открытия, сделанные на этом пути, оказались настолько своеобразными, свойства вещества — такими необычными, что получение низких температур и сами исследования в условиях сверхглубокого холода выделились в самостоятельную научно-техническую область — физику и технику низких температур. При низких температурах было обнаружено одно из самых удивительных явлений в природе — *сверхпроводимость*.

О сверхпроводимости стало известно в 1911 г., но на протяжении десятилетий исследованиями этого загадочного, интригующего своей таинственностью явления занимались лишь немногие физические лаборатории. Долгое время о сверхпроводимости знал очень узкий круг ученых, занятых разработкой фундаментальных основ физики твердого тела, термодинамики, электромагнетизма. Прошло почти полвека от открытия до истинного понимания сверхпроводимости — срок чрезвычайно большой для нашего стремительного века.

Сегодня сверхпроводимость — это одна из наиболее изучаемых областей физики, явление, открывающее перед инженерной практикой серьезные перспективы.

Что же представляет собой сверхпроводимость? Какой смысл заложен в этом понятии? В силу каких своих качеств сверхпроводники находят столь широкое применение в самых различных областях деятельности человека? Ответы на эти вопросы читатель получит, прочитав данную книгу. При этом он познакомится не только с физической сущностью поставленных вопросов, но также и с историей достижения низких температур (эту историю нередко называют путем к абсолютному нулю), узнает о возможностях и перспективах развития прикладной сверхпроводимости.

Мир сверхпроводников — мир необычный. В этом мире хозяйничают квантовые законы. Неискушенный читатель встретится здесь с множеством новых понятий, к которым нелегко привыкнуть. Отчетливо представляя себе это, автор стремился рассказать о сверхпроводниках языком, доступным читателю, не владеющему специальными физическими и математическими знаниями. Однако книга не предназначается для легкого, развлекательного чтения. Читателю придется проявить известное терпение, чтобы усвоить некоторые относительно трудоемкие главы книги, и в частности начальные главы, где рассматриваются основные положения современной теории твердого тела и обсуждается природа сверхпроводящего состояния. Никакой специальной подготовки здесь не требуется, нужно лишь терпение, наградой за которое будет, как надеется автор, удовлетворение от чтения последующих глав.

Эти главы посвящены сверхпроводникам — их «профессиям». Прикладное значение сверхпроводимости велико и продолжает возрастать. Это громадные сверхпроводящие магниты, предназначенные приблизить осуществление управляемого термоядерного синтеза, и сверхмощное электромашиностроение, и скоростной транспорт на магнитных подушках, и целая отрасль электроники — криоэлектроника и многое, многое другое.

Автору хотелось бы, чтобы путешествие в холодный мир сверхпроводников было интересным читателю и привлекало бы его внимание к самому явлению сверхпроводимости, фундаментальная сущность которой широко проявляется в природе, вовсе не ограничиваясь электрическим током в металлах, охлажденных до низких температур; показало бы ему ту исключительно важную роль, какую играет это явление в научном познании мира, в практической деятельности человека. Все это, как надеется автор, должно сделать путешествие достаточно увлекательным и полезным.

# ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

---

## ЭТА СТРАННАЯ

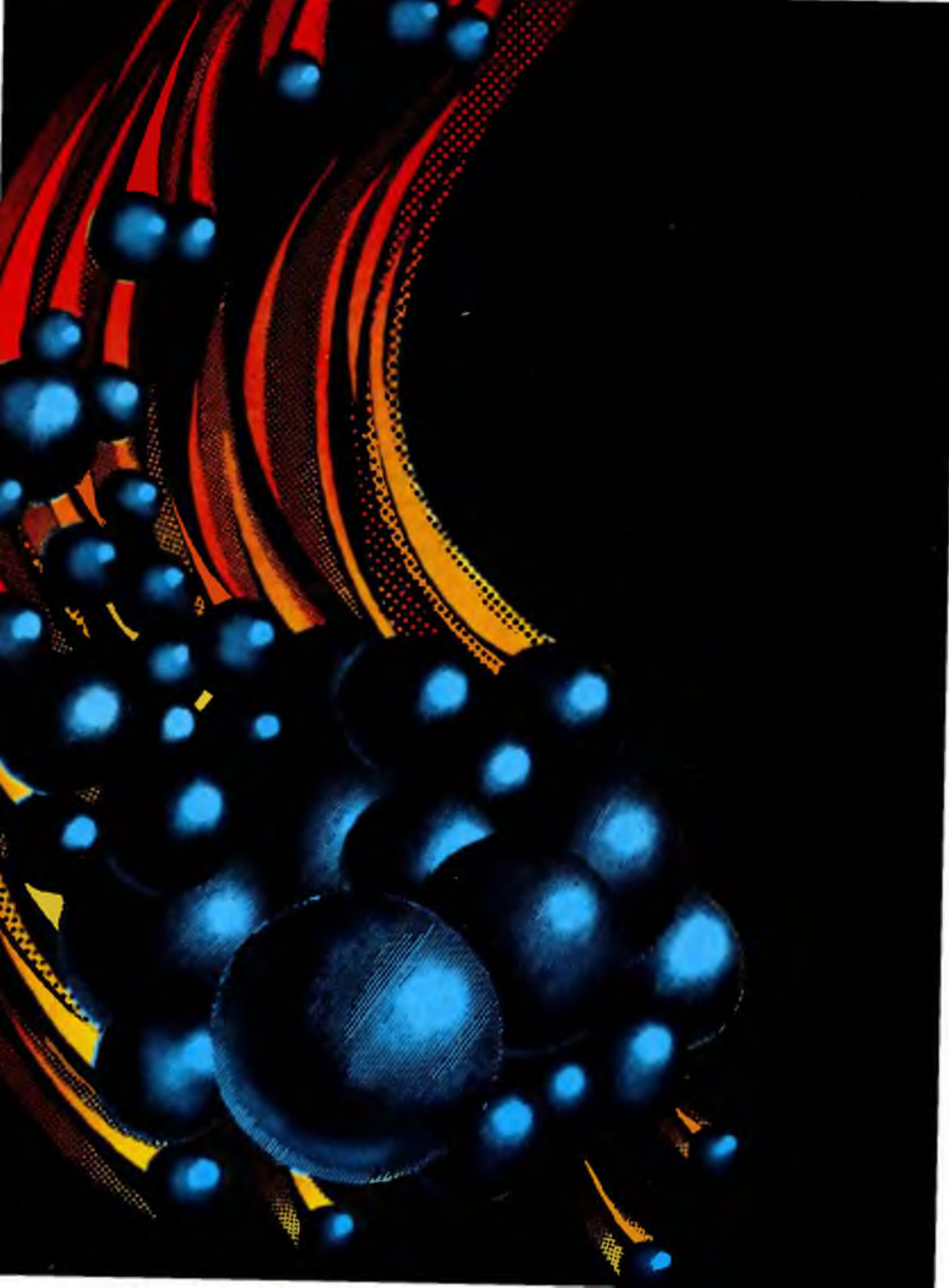
## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

---

Самое прекрасное, что мы можем испытать,— это ощущение тайны. Она есть источник всякого подлинного искусства и всей науки.

*А. Эйнштейн*

- ЧУДЕСА ВБЛИЗИ АБСОЛЮТНОГО  
НУЛЯ
- ПОЛВЕКА ЗАГАДОК И ОТКРЫТИЙ
- ПУТЬ К МИКРОТЕОРИИ
- ПРОНИКНОВЕНИЕ В СУЩНОСТЬ
- ТУННЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ







## ЧУДЕСА ВБЛИЗИ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

Так рождалась сказка о стране чудес, так шаг за шагом разворачивались удивительные события.

*Л. Кэрролл. «Алиса в стране чудес»*

Немало поводов для размышлений принесло физикам начало XX столетия. Среди них результаты опытов в условиях сверхглубокого холода при температурах всего лишь на несколько градусов выше абсолютного нуля.

Понятие *абсолютный нуль* вошло в физику в середине прошлого века. Родившись из газового закона, оно постепенно распространилось на все состояния вещества, приобрело фундаментальное значение для всей физики.

Абсолютному нулю соответствует температура  $-273^{\circ}\text{C}$  (точнее,  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ). Любое вещество больше охладить нельзя, т. е. нельзя у него отнять еще энергию. Иными словами, при абсолютном нуле молекулы вещества обладают наименьшей возможной энергией, которая уже не может быть отнята у тела ни при каком охлаждении. При каждой попытке охладить вещество энергии в нем остается все меньше и меньше, но всю ее вещество никогда не сможет отдать охлаждающему устройству. По этой причине ученые не достигли абсолютного нуля и не надеются сделать это, хотя они уже творят чудеса, достигая температур порядка миллионных долей градуса.

Так как абсолютный нуль есть самая низкая температура, то естественно, что в физике, особенно в тех ее разделах, где речь идет о низких температурах, пользуются термодинамической температурной шкалой, которая может быть програддуирована в кельвинах (К) и в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ); соотношение между температурами при любой из этих шкал:  $T = t + 273$ , где  $T$  — абсолютная температура, К;  $t$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Исследования при температурах, близких к абсолютному нулю, давно привлекали к себе внимание ученых. Такие температуры физики называют *криогенными* (от греческого слова «крио» — *холод*).

При криогенных температурах происходит много удивительного. Ртуть замерзает так, что ею можно забивать гвозди, резина разлетается на осколки от удара молотком, некоторые металлы становятся хрупкими как стекло.

Все это любопытно, но суть получения низких температур гораздо глубже. Поведение вещества вблизи абсолютного нуля заставило нас не иметь ничего общего с его поведением при обычных температурах. Казалось бы, вместе с теплом из вещества уходит и энергия, а застывшее вещество уже не может представлять интереса.

Еще столетие назад так и считали: абсолютный нуль — это смерть материи. Но вот физики получили возможность работать при сверхнизких температурах, и оказалось, что область абсолютного нуля не такая уж мертвая. Совсем наоборот: здесь начинают проявляться многочисленные красивые эффекты, которые при обычных условиях, как правило, замаскированы тепловым движением атомов. Именно здесь начинается тот мир — удивительный и порой парадоксальный, который называется сверхпроводимостью.

*Сверхпроводимость* — способность вещества пропускать электрический ток, не оказывая ему ни малейшего сопротивления. Открытием этого уникального явления, не имеющего аналога в классической физике, мы обязаны замечательному голландскому ученому Гейке Камерлинг-Оннесу.

Камерлинг-Оннес проложил дорогу. По ней уже более 75 лет идут многие ученые мира, и еще долго останется она оживленной магистралью науки. Но как бы далеко от начала мы ни ушли, следует помнить, что когда-то ее вовсе не было на карте естествознания.

## У НАЧАЛА ПУТИ

Удивительное событие в науке — открытие. А еще удивительнее путь, которым приходит к нему человек. Он пробивается вперед сквозь, казалось бы, непроходимые дебри, всегда вынужден сомневаться, ибо дороги впереди нет и ее приходится строить позади себя, как говорил немецкий физик Макс Борн.

Более 100 лет ученые упорно продвигались к естественной нижней границе температур — абсолютному нулю. Догадка о существовании нового интересного мира низких температур высказывалась учеными еще задолго до опытов Камерлинг-Оннеса. По-видимому, первым ясно высказал эту мысль великий французский химик Лавуазье, который еще в 1783 г. писал: «...если бы мы могли погрузить Землю в некую весьма холодную область, например в атмосферу Юпитера или Сатурна, то все наши реки и океаны превратились бы в горы. Воздух перестал бы быть невидимым и превратился бы в жидкость. Превращение такого рода открыло бы возможность получения новых жидкостей, о которых мы до сих пор не имеем никакого понятия».

Конечно, эти замечательные слова были только прекрасной догадкой. Чтобы превратить эту догадку в надежно установленный научный факт, потребовалось множество опытов по сжижению газов. И последующее движение в этом направлении можно с полным основанием назвать дорогой к абсолютному нулю.

Первый шаг на этом пути был сделан еще в конце XVIII в. В XIX в. были сжижены уже многие газы. Опыты следовали один за другим — превращены в жидкость кислород, азот, водород. Один лишь гелий не поддавался усилиям ученых. Полагали даже, что этот газ занимает в мире какое-то особое положение, поэтому он и не превращается в жидкость. Во многих лабора-

ториях мира экспериментаторы активно искали способы получения жидкого гелия. Успех выпал на долю Камерлинг-Оннеса. Именно в его лаборатории низких температур в Лейденском университете был проведен эксперимент, ставший последней страницей в истории поиска новых жидкостей.

Успех голландского физика не был случайным. Задача была решена человеком, понявшим коллективный характер науки XX столетия, создавшим, может быть, первую по-настоящему современную научную лабораторию. Это был ученый необычного склада, физик, инженер, организатор, он один из первых понял, что проникновение во все более глубокие тайны природы требует мощной технологической базы, уникального оборудования, хорошо подготовленного вспомогательного персонала.

В наши дни такая постановка вопроса никого бы не удивила. Мы привыкли уже к масштабным физическим исследованиям. Но в начале века Оннес резко выделялся на фоне многих экспериментаторов, проводивших свои исследования с помощью небольших лабораторных установок. Уже первая установка для сжижения кислорода, азота и других атмосферных газов, сконструированная им в 1894 г., имела такую производительность, что смогла удовлетворить быстро растущие потребности лаборатории в течение многих лет.

При Камерлинг-Оннесе Лейденский университет, по существу, превратился как бы в единую лабораторию низких температур. Здесь работала знаменитая лейденская школа стеклодувов и прибористов. Ее выпускники, казалось, могли сделать своими руками все что угодно. Под руководством Камерлинг-Оннеса изготовлялось не лабораторное оборудование, а делались, выражаясь сегодняшним языком, полупромышленные установки, в которых низкотемпературные жидкости получали не каплями, а литрами. По сути дела, лаборатория Оннеса стала прообразом и моделью для научно-исследовательских институтов XX в. Выпускался даже специальный научный журнал «Сообщения из физической лаборатории Лейденского университета». Двери лаборатории были широко распахнуты перед всеми, кто хотел работать в области криогенной техники.

Техническое преимущество Лейденской лаборатории дало себя знать довольно быстро. За короткий срок Камерлинг-Оннес преодолел все известные ступени на пути к абсолютному нулю. Последовательно были превращены в жидкость кислород, неон, водород. Следующий шаг был очевиден — жидкий гелий.

В присутствии физиков, приглашенных из разных стран, 10 июля 1908 г. началась исторический эксперимент. Сжижение гелия проводилось на каскадной установке, которая и сегодня удивляет инженеров своим совершенством. Штурм начался в 6 ч утра с сжижения 20 л водорода, необходимого для охлаждения гелия. Эта работа была завершена к 2 ч дня. Через 3 ч началась циркуляция охлажденного гелия, и с этого момента внутренний криостат сжижителя оказался в области еще не исследованных низких температур.

В течение длительного времени показания термометра с разреженным гелием почти не изменялись. После дополнительной регулировки аппара-

туры было отмечено постепенное снижение температуры, но вскоре оно прекратилось.

Шли часы. Уже был израсходован почти весь имевшийся жидкий водород, а никаких признаков сжижения гелия еще не было. В 8 ч вечера напряжение достигло предела. Казалось, что и эта попытка окончится неудачей, и именно в этот критический момент один из присутствующих физиков высказал предположение, что, возможно, жидкость уже кипит, поэтому термометр и не показывает уменьшения температуры. Сосуд осветили снизу, и неожиданно стал видимым уровень жидкости, ясно различимый благодаря отражению света. Сосуд почти целиком был заполнен бесцветной жидкостью. Жидкий гелий... 4,2 К — решающая ступенька к абсолютному нулю! Вот как описывает этот волнующий момент сам Камерлинг-Оннес: «Это было удивительное зрелище — появление впервые жидкости, имеющей почти нематериальный вид. Втекание ее в сосуд не было замечено. Ее присутствие было замечено, когда она уже наполнила сосуд, а ее поверхность выделялась остро, как лезвие ножа...»

Разумеется, — и тут не нужны документальные подтверждения — он был взволнован, и счастлив, и горд, и смущен. Его поздравляли с огромным достижением, не предполагая, что перед физикой приоткрылась дорога в мир особых явлений. И никто не догадывался, что он уже стоит на пороге нового эпохального открытия. Его чествовали в Лейдене, не зная, что главное у него еще впереди.

## ЛЕЙДЕН, 1911 г. ОТКРЫТИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Шел 1911 год. Камерлинг-Оннес работал над проблемой, которая значилась в тогдашней лейденской исследовательской программе как «изучение свойств различных веществ при гелиевых температурах».

Одним из первых исследований, проведенным Оннесом в новой температурной области, было изучение зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Этот вопрос уже давно волновал умы ученых. Словно предвидя развитие событий электротехники, еще в XIX в. ввели в теорию электричества термин *идеальный проводник*, т. е. проводник без электрического сопротивления. С другой стороны, и физики, изучавшие свойства металлов, установили, что при снижении температуры сопротивление металла уменьшается. Но им уже удалось добраться до температуры жидкого водорода, а сопротивление образцов из чистых металлов все падало и падало. А что же дальше? Каким будет предельное значение сопротивления проводника при приближении его температуры к абсолютному нулю? Вот этого никто и не знал. В принципе можно было предположить три возможных варианта. Они изображены на рисунке 1.

Большинство ученых придерживалось мнения: при абсолютном нуле электрическое сопротивление должно исчезать (см. кривую 1 на рис. 1).

Действительно, электрический ток — это поток свободных электронов, проходящих сквозь кристаллическую решетку проводника. Если бы кристалл был идеальным, а его атомы строго неподвижны, то электроны двигались бы совершенно свободно, не встречая помех со стороны кристаллической решетки. Такой кристалл был бы идеальным проводником с нулевым сопротивлением. Однако, во-первых, беспорядочные колебания атомов решетки нарушают ее структуру, а во-вторых, электроны, движущиеся в кристалле, могут взаимодействовать с колеблющимися атомами, передавать им часть своей энергии, что и означает появление *электрического сопротивления*. При понижении температуры амплитуда колебаний атомов уменьшается, следовательно, столкновения свободных электронов с ними становятся более редкими, и, таким образом, ток встречает меньшее сопротивление. При абсолютном нуле, когда решетка уже неподвижна, сопротивление проводника становится равным нулю. Такая модель продолжительное время удовлетворяла физиков. Никто не удивился бы, если это оказалось бы так, хотя было непонятно, почему электроны должны сталкиваться только с атомами, совершающими беспорядочные движения, но свободно пролетать мимо неподвижных, как будто электрону легче попасть в движущийся атом.

Впрочем, теоретически были возможны и другие варианты. Например, небольшое сопротивление току могло сохраниться и при абсолютном нуле (см. кривая 2 на рис. 1), поскольку и тогда некоторые электроны все еще сталкивались бы с атомами решетки. Кроме того, кристаллические решетки, как правило, не являются идеальными: в них всегда есть дефекты (неправильности) и примеси посторонних атомов. С другой стороны, была выдвинута гипотеза, согласно которой электроны проводимости при низких температурах объединяются с атомами, что приводит к бесконечно большому сопротивлению при температуре  $T = 0\text{K}$  (см. кривая 3 на рис. 1).

Как видите, существующие теории давали совершенно противоположные предсказания, и тем не менее до 1911 г. трудно было представить себе еще какой-нибудь вариант. Нужен был эксперимент. Опыт и только опыт может служить основой физических моделей и критерием их справедливости. Вполне понятно, что одним из первых экспериментов при температурах жидкого гелия стало измерение сопротивления металлов. Сам физический полюс холода, как известно, не доступен эксперименту, поэтому Камерлинг-Оннес, который к тому времени располагал возможностью получать температуры лишь на один градус выше абсолютного нуля, измерял электрическое сопротивление металлов при разных температурах.

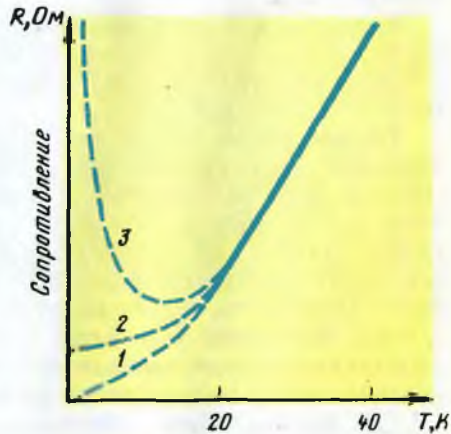


Рис. 1

Затем строились кривые, которые можно было продолжить, т. е. как бы составить прогноз для интересующей нас области.

Сначала Оннес исследовал образцы платины и золота, так как именно эти металлы тогда имелись в достаточно чистом виде. Особых новостей не было. Полученные им результаты, в общем, укладывались в рамки существовавших теорий. При понижении температуры сопротивление образцов исправно падало, стремясь к некоторому постоянному значению (остаточному сопротивлению). Однако Оннес обратил внимание на то, что значения электрических сопротивлений различных образцов при прочих равных условиях были тем меньше, чем чище оказывался металл. Отсюда вывод: «...учитывая поправку на добавочное сопротивление, я пришел к заключению, что сопротивление абсолютно чистой платины при температуре кипения жидкого гелия, возможно, исчезнет».

Задача, таким образом, заключалась в исследовании возможно более чистого образца. А в те времена чистым металлом можно было считать, пожалуй, одну только ртуть. Дело в том, что это вещество при комнатной температуре находится в жидкой фазе и путем последовательной перегонки можно получать все более и более чистую ртуть.

Итак, ртуть. Оннес заморозил ее в сосуде, содержащем жидкий гелий, и приступил к измерению сопротивления. И вот тут его ожидал сюрприз, да еще какой!

Вначале все шло так, как предусматривала теория. Электрическое сопротивление ртути плавно падало по мере снижения температуры: 10; 5; 4,2 К, и сопротивление стало таким малым, что его вообще не удавалось зарегистрировать приборами, имевшимися в лаборатории. Позднее, в 1913 г., вспоминая этот период своих исследований, Оннес писал: «Будущее казалось мне прекрасным. Я не видел перед собой трудностей. Они были преодолены, и убедительность эксперимента не вызывала сомнений». И вдруг случилось неожиданное.

В ходе дальнейших экспериментов на усовершенствованной аппаратуре Оннес обнаружил, что сопротивление ртути при температуре около 4,1 К уменьшалось не плавно, а скачком до неизмеримо малой величины, т. е. исчезало начисто (рис. 2).

Первая мысль была о неисправности прибора, с помощью которого измерялось сопротивление. Включили другой. И вновь при температуре 4,1 К стрелка прибора прыгнула к нулю. Здесь было от чего прийти в замешательство: до абсолютного нуля было еще целых четыре градуса. Конечно, Оннес понимал, что ошибки опыта, даже самого тонкого, неизбежны. И он повторяет эксперимент еще и еще раз. Изготавливает из ртути новый образец; берет даже очень загрязненную ртуть, у которой остаточное сопротивление должно быть ярко выражено; заменяет измерительный прибор точнейшим зеркальным гальванометром. Все это в надежде обнаружить хотя бы следы сопротивления. Ведь не могло же оно просто так исчезнуть. Чудес не бывает.

Но сопротивление по-прежнему исчезало (скачок происходил в чрезвычайно узкой области температур, порядка сотых долей градуса). Вот тогда, наверное, Камерлинг-Оннес впервые и произнес слово «сверхпрово-

димостью». Вывод, пожалуй, самый удивительный, поразивший не только физиков, но и всех, кто сколько-нибудь интересовался электричеством, был сделан: «...не осталось сомнений, — писал Камерлинг-Оннес, — в существовании нового состояния ртути, в котором сопротивление фактически исчезает... Ртуть перешла в новое состояние, и, учитывая его исключительные электрические свойства, его можно назвать сверхпроводящим состоянием».

Так было открыто, может быть, одно из самых интересных и загадочных явлений физики XX столетия. В конце апреля 1911 г. Камерлинг-Оннес сообщил о результатах своих экспериментов Нидерландской королевской академии, а в мае 1911 г. о сверхпроводимости узнали физики всего мира.

Нет нужды говорить о том, какая это была сенсация. Камерлинг-Оннес сразу стал знаменитостью. Теперь с его именем связывались два существенных события в физике: жидкий гелий и сверхпроводимость. Мир оценил значение этих открытий. В 1913 г. Камерлинг-Оннесу была присуждена Нобелевская премия.

Формула награждения была исчерпывающе точна: «...за исследование свойств тел при низких температурах и получение жидкого гелия». Ничего другого в ней пока не могло содержаться. В те времена никто не мог представить себе, какое огромное количество фундаментальных проблем и интересных возможностей таят в себе эти открытия. Сверхпроводимость была пока «вещью в себе». Тут где-то физика кончалась и начиналась непроглядная тьма. И единственное, что светилось в этой тьме неведения, — это бесспорный экспериментальный факт исчезновения сопротивления.

Разумеется, Оннес думал о загадке сверхпроводимости, но тогда, в декабре 1913 г., ему оставалось только предполагать: «Эта работа должна приподнять покрывало, которым тепловое движение при обычных температурах закрывает от нас внутренний мир атомов и электронов... Из всех областей физики к нам приходят вопросы, ожидающие решения от измерений при гелиевых температурах».

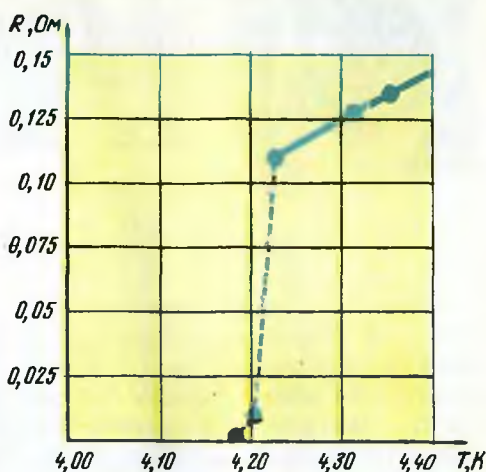


Рис. 2



## ГЛАВА 2

### ПОЛВЕКА ЗАГАДОК И ОТКРЫТИЙ

Все это было тайной для людей  
И стало им открыто лишь поздней.

Гете. «Фауст»

Открытие сверхпроводимости было лишь первым знакомством с этим загадочным, интригующим своей таинственностью явлением. Проникнуть в тайну природы, узнать причину возникновения сверхпроводимости — вот очередная задача, которую предстояло решать. Однако прошло почти полвека, прежде чем ее удалось решить. Только в конце 50-х годов нашего столетия была построена полная теория сверхпроводимости. Впрочем, отсутствие этой теории отнюдь не означало, что ученые сидели сложа руки. Наоборот, обнаружив переход вещества в совершенно новое состояние, они упорно трудились, пытаясь досконально изучить его свойства.

Первым вставал вопрос: *сверхпроводимость — это свойство одной ртути или оно присуще всем металлам?* Выяснилось, что ртуть вовсе не является монополюсной обладательницей свойства сверхпроводимости. Некоторые другие металлы, такие, например, как свинец и олово, также становятся сверхпроводниками.

Другой естественный вопрос: *действительно ли с достижением некоторого критического значения температуры сопротивление скачком падает до нуля?* Может быть, оно очень мало и мы не замечаем его лишь потому, что не обладаем совершенной измерительной техникой?

### КОГДА ИСЧЕЗАЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Ответ на этот вопрос получил сам Камерлинг-Оннес еще в 1914 г. Он предложил весьма остроумный метод измерения сопротивления. Схема эксперимента выглядела довольно просто (рис. 3).

Катушку из свинцового провода опускали в криостат — устройство для проведения опытов при низких температурах. В начале опыта ключ 1 был замкнут, а 2 разомкнут. Охлаждаемая гелием катушка находилась в сверхпроводящем состоянии. При этом ток, идущий по катушке, создавал вокруг нее магнитное поле, которое легко обнаруживалось по отклонению магнитной стрелки, расположенной вне криостата. Затем ключ 2 замыкался, а ключ 1 размыкался, так что теперь сверхпроводящая обмотка оказывалась замкнутой накоротко. Стрелка компаса, однако, оставалась отклоненной, что указывало на наличие тока в катушке, уже отсоединенной от источ-



ника тока. Наблюдая за стрелкой на протяжении нескольких часов (пока не испарился весь гелий из сосуда), Оннес не заметил ни малейшего изменения в отклонении стрелки. «Даже на следующий день,— писал Оннес,— электроны продолжали свое движение. Лишь только катушку вынимали из жидкого гелия, ток немедленно прекращался. Этот опыт производит огромное впечатление».

По результатам опыта Оннес пришел к заключению, что сопротивление сверхпроводящей свинцовой проволоки по меньшей мере в  $10^{11}$  раз меньше ее сопротивления в нормальном (несверхпроводящем) состоянии.

Впоследствии аналогичные опыты по наведению тока и контролю его затухания в замкнутых сверхпроводящих петлях неоднократно проводились и другими исследователями. Ни в одном из подобных опытов не было отмечено изменение тока. Было установлено, что время затухания тока превышает многие годы, и из этого следовало, что удельное сопротивление сверхпроводника меньше чем  $10^{-25}$  Ом·м. Сравните это с удельным сопротивлением меди при комнатной температуре  $1,55 \cdot 10^{-8}$  Ом·м — разница столь огромна, что смело можно считать: сопротивление сверхпроводника равно нулю. Действительно, трудно назвать другую наблюдаемую и изменяемую физическую величину, которая обращалась бы в такой же «круглый нуль», как сопротивление сверхпроводника при температуре ниже критической.

Этот нуль очень заинтересовал многих физиков не только как странное и непонятное явление, но и в практическом плане. Вспомните известный из школьного курса физики закон Джоуля—Ленца: при протекании тока  $I$  по проводнику сопротивлением  $R$  в нем выделяется тепло. На это расходуется мощность  $P=I^2R$ . Как ни мало сопротивление металлов, но зачастую и оно ограничивает технические возможности различных устройств. Нагреваются провода, кабели, машины, аппараты, вследствие этого миллионы киловатт электроэнергии буквально выбрасываются на ветер. Нагрев ограничивает пропускную способность линий электропередач, мощность электрических машин. Так, в частности, обстоит дело и с электромагнитами. Получение сильных магнитных полей требует больших токов, что приводит к выделению колоссального количества тепла в обмотках электромагнита. А вот сверхпроводящая цепь остается холодной. В ней, однажды возбужденной, ток будет циркулировать не затухая — сопротивление равно нулю, потерь электроэнергии нет.

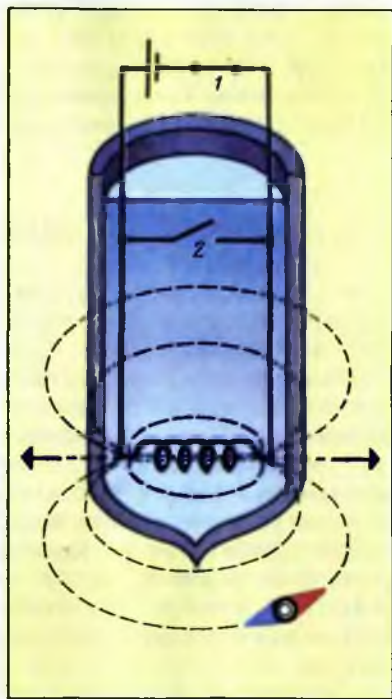


Рис. 3

Сам Камерлинг-Оннес вначале полагал, что с освоением сверхпроводимости для электротехники начнется золотой век. Уже в 1913 г. он публикует в журнале «Сообщения из лейденской лаборатории» статью, в которой предлагает построить мощный электромагнит с обмотками из сверхпроводящего материала. Такой магнит не потреблял бы электроэнергию, и с его помощью можно было бы получать сверхсильные магнитные поля. Поскольку, рассуждал Оннес, сопротивление равно нулю, то ток в цепи в соответствии с законом Ома может быть сколь угодно большим. Если бы так...

*Как только пробовали пропускать по сверхпроводнику значительный ток, сверхпроводимость исчезала.* И это еще не все. Вскоре оказалось, что и слабое магнитное поле (с индукцией, самое большее, в сотые доли тесла) также уничтожает сверхпроводимость. Это грустное открытие на долгие годы погасило радужные надежды физиков и электротехников. Существование критических значений температуры, тока и магнитной индукции резко ограничивало практические возможности сверхпроводников. Стало ясно, что сверхпроводимость — не более чем физическая игрушка, феномен, возбуждающий любопытство физиков. Видимо, убежденный в этом, ушел на покой Камерлинг-Оннес, оставив лейденскую лабораторию своим ученикам Кеезому и Хаазу.

Шли годы. За это время развилась и окрепла квантовая механика. Физики проникли в атомное ядро и начали там хозяйничать. Было открыто множество элементарных частиц, осуществлены ядерная и термоядерная реакции, открыты и поняты сотни явлений в самых разных областях науки. Но «сфинкс» сверхпроводимости продолжал молчать, хотя экспериментально это явление было изучено весьма тщательно.

## СВЕРХПРОВОДНИК В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

То, что в магнитном поле, превышающем некоторое пороговое или критическое значение, сверхпроводимость исчезает, совершенно бесспорно. Это экспериментальный факт. Даже если какой-то металл и лишится сопротивления при охлаждении, то он может снова вернуться в нормальное состояние, попав во внешнее магнитное поле. При этом у металла восстанавливается примерно то же сопротивление, которое было у него при температуре, превышающей температуру  $T_k$  сверхпроводящего перехода. Само критическое поле с магнитной индукцией  $B_k$  зависит от температуры: индукция равна нулю при температуре  $T = T_k$  и возрастает при температуре, стремящейся к нулю. Конечно, все металлы имеют разные значения магнитной индукции  $B_k$ , но для многих из них зависимость индукции  $B_k$  от температуры подобна, как видно из рисунка 4, а. Это породило уверенность, что механизм сверхпроводимости для всех металлов качественно один и тот же.

Рисунок 4, б можно рассматривать и как диаграмму, где линия зависимости  $B(T)$  для каждого металла разграничивает области существо-

вания разных фаз. Область ниже этой линии соответствует сверхпроводящему состоянию, выше — нормальному.

Рассмотрим теперь поведение идеального проводника (т. е. проводника, лишённого сопротивления) в различных условиях. У такого проводника при охлаждении ниже критической температуры электропроводность становится бесконечной. Именно это свойство и позволяло считать сверхпроводник идеальным проводником.

Магнитные свойства идеального проводника вытекали из закона индукции Фарадея и условия бесконечной электропроводности. Предположим, что переход металла в сверхпроводящее состояние происходит в отсутствие магнитного поля и внешнее магнитное поле прикладывается лишь после исчезновения сопротивления. Здесь не надо никаких тонких экспериментов, чтобы убедиться в том, что магнитное поле внутрь сверхпроводника не проникает. Действительно, когда металл попадает в магнитное поле, то на его поверхности вследствие электромагнитной индукции возникают незатухающие замкнутые токи (их часто называют экранирующими токами), создающие свое магнитное поле, индукция которого по модулю равна индукции внешнего магнитного поля, а направления векторов магнитной индукции этих полей противоположны. В результате индукция суммарного магнитного поля внутри идеального проводника равна нулю. Возникает ситуация, при которой металл как бы препятствует проникновению в него магнитного поля, т. е. ведет себя как диамагнетик. Если теперь внешнее магнитное поле убрать, то образец окажется в своем начальном немагнитном состоянии (рис. 5).

Рассмотрим другую последовательность событий. Металл, находящийся в нормальном состоянии, поместим в магнитное поле и затем охладим его для того, чтобы он перешел в сверхпроводящее состояние. Исчезновение электрического сопротивления не должно оказывать влияния на намагниченность образца, и поэтому распределение магнитного потока в нем не изменится. Если теперь приложенное магнитное поле убрать, то изменение потока внешнего магнитного поля через объем образца приведет (по закону индукции) к появлению незатухающих токов, магнитное поле которых точно компенсирует изменение внешнего магнитного поля. В результате захваченное поле не сможет уйти: оно окажется «замороженным» в объеме образца и останется там как в своеобразной ловушке (рис. 6).

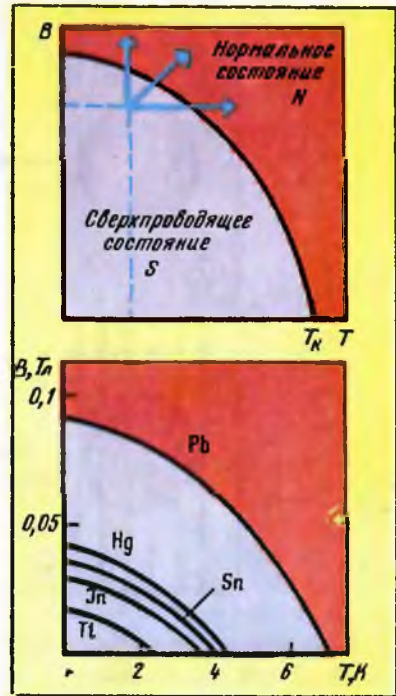


Рис. 4

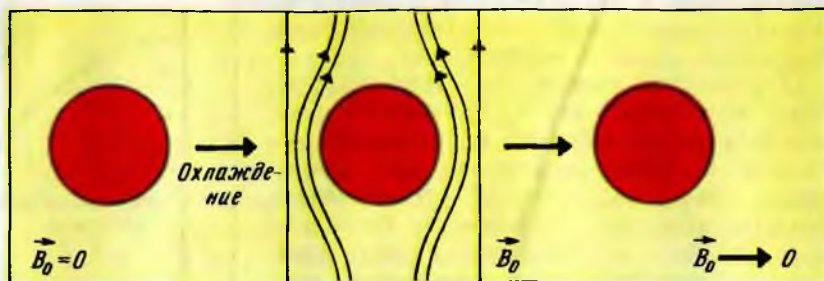


Рис. 5

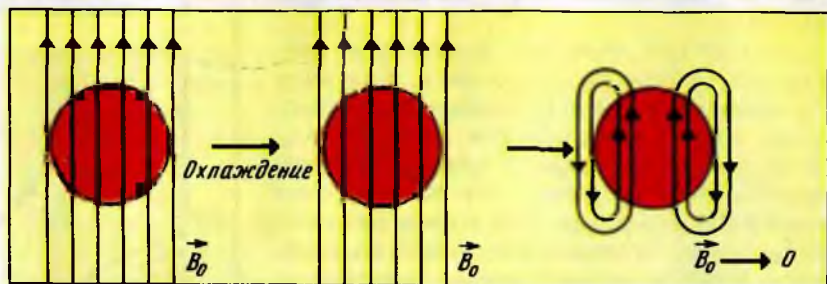


Рис. 6

Как видим, магнитные свойства идеального проводника зависят от того, каким путем он попадает в магнитное поле. В самом деле, в конце этих двух операций — приложения и снятия поля — металл оказывается в одних и тех же условиях — при одинаковой температуре и нулевом внешнем магнитном поле. Но магнитная индукция металла-образца в обоих случаях совершенно различна — нулевая в первом случае и конечная, зависящая от исходного поля во втором.

Эти представления, основанные на многократно проверенных законах электромагнетизма, казалось бы, отлично соответствовали опыту. Во всяком случае, в одном из своих экспериментов Камерлинг-Оннес подтвердил такое сложное поведение сверхпроводника. И все же нарисованная выше картина оказалась неверной. Сверхпроводники, как выяснилось, — это нечто большее, нежели вещества с бесконечной электропроводностью.

## ИДЕАЛЬНЫЙ ПРОВОДНИК ИЛИ ИДЕАЛЬНЫЙ ДИАМАГНЕТИК?

Если первое основное свойство сверхпроводников — отсутствие сопротивления — было обнаружено в 1911 г., то второе важнейшее свойство лишь спустя 22 года.

В 1933 г. немецкие физики Мейснер и Оксенфельд решили экспериментально проверить, как именно распределяется магнитное поле вокруг

сверхпроводника. Результат оказался неожиданным. Независимо от условий проведения эксперимента *магнитное поле в глубь сверхпроводника не проникало*. Поразительный факт, обнаруженный Мейснером и Оксенфельдом, заключался в том, что сверхпроводник, охлажденный ниже критической температуры в постоянном магнитном поле, самопроизвольно *выталкивает* это поле из своего объема, переходя в состояние, при котором магнитная индукция  $B = 0$ , т. е. состояние *идеального диамагнетизма*. Это явление получило название эффекта Мейснера.

Как известно, металлы, за исключением ферромагнетиков, в отсутствие внешнего магнитного поля обладают нулевой магнитной индукцией. Помещенные во внешнее магнитное поле, они намагничиваются, т. е. внутри «наводится» магнитное поле. Суммарное магнитное поле вещества, внесенного во внешнее магнитное поле, характеризуется магнитной индукцией  $\vec{B}$ , равной векторной сумме индукции  $B_0$  внешнего и индукции  $\vec{B}$  внутренних магнитных полей, т. е.  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1$ . При этом суммарное магнитное поле может быть как больше, так и меньше магнитного поля.

Для того чтобы определить степень участия вещества в создании магнитного поля индукцией  $\vec{B}$ , находят отношение значений индукции  $B / B_0 = \mu$ . Коэффициент  $\mu$  называют магнитной проницаемостью вещества. Вещества, в которых при наложении внешнего магнитного поля возникающее внутреннее поле добавляется к внешнему ( $\mu > 1$ ), называются парамагнетиками.

В диамагнетиках ( $\mu < 1$ ) наблюдается ослабление приложенного поля, внутреннее поле направлено против внешнего, и индукция  $B < B_0$ . В сверхпроводниках  $B = 0$ , что соответствует нулевой магнитной проницаемости. Имеет место, как говорят, эффект идеального диамагнетизма.

Итак, в отличие от идеальных проводников сверхпроводники не позволяют магнитному полю проникнуть в их толщу. Если сверхпроводящий проводник поместить во внешнее магнитное поле, то в поверхностном слое металла возникнут экранирующие токи, которые создадут внутри проводника магнитное поле, равное и противоположное внешнему. Распределение поля становится таким, как изображено на рисунке 7. Магнитное поле, ранее однородно пронизывающее нормальный металл, при температуре  $T < T_c$  оказывается вытолкнутым из металла, концентрируясь на его периферии

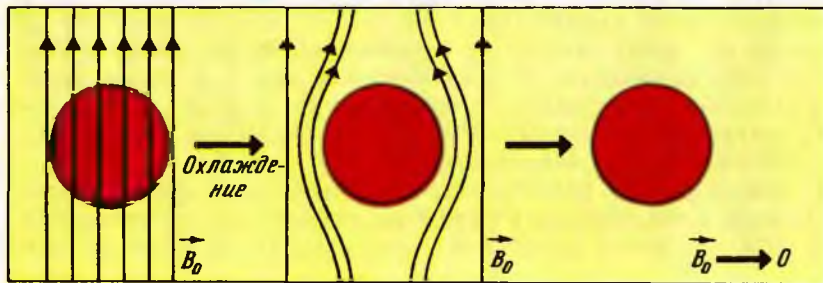


Рис. 7

Здесь мы встречаемся с любопытным фактом. Хорошо известно, что в замкнутом контуре ток появляется только в том случае, когда электромагнитное поле меняется во времени. В случае эффекта Мейснера это поле постоянно во времени. В соответствии с известными физическими представлениями, казалось бы, нет никаких причин для появления токов, создающих собственное магнитное поле, направленное противоположно приложенному.

Однако диамагнетизм сверхпроводников можно продемонстрировать с помощью весьма эффектного опыта. Представьте себе магнит, который свободно парит в воздухе над слоем сверхпроводящего материала. Эксперимент этот, называемый иногда «магометовым гробом» (по преданию, гроб с телом пророка Магомета висел в пространстве без всякой поддержки), был осуществлен еще в 1945 г. московским профессором В. К. Аркадьевым. Постоянный магнит, лежащий на свинцовой пластинке, поднимался на некоторую высоту и висел над пластинкой, в которой циркулировали незатухающие сверхпроводящие токи. Магнит свободно парил над слоем сверхпроводника, полностью поддерживаемый собственным магнитным полем.

Для магнитного поля сверхпроводник — непреодолимая преграда, плоскость, от которой, как от зеркала, отражается это поле. Малейшее движение магнита вызывает изменение магнитного поля сверхпроводящих токов — поле как бы следит за магнитом. С увеличением магнитного поля сверхпроводящие экранирующие токи тоже возрастают, чтобы сохранить идеальный диамагнетизм. Когда приложенное магнитное поле становится достаточно большим, экранирующие токи достигают своего критического значения и металл теряет сверхпроводящие свойства. При этом экранирующие токи исчезают, и магнитное поле проникает в металл.

## УРАВНЕНИЕ ЛОНДОНОВ. ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ

Отсутствие электрического сопротивления, эффект Мейснера, существование критического магнитного поля, разрушающего сверхпроводимость, — все это поставило перед физиками чрезвычайно сложную задачу. Ведь до сих пор сверхпроводимость рассматривалась только в свете представлений об идеальном проводнике. Правда, уже было известно, что сверхпроводники ведут себя как диамагнетики, но так как их диамагнетизм не был идеальным, то этот факт особых хлопот физикам не доставлял. «Магнитная» сторона сверхпроводимости вполне укладывалась в рамки существующей теории электромагнетизма. Теперь нужно было каким-то образом включить в эту теорию факт существования сверхпроводников с их идеальными электропроводимостью и диамагнетизмом.

В 1935 г. немецкие физики братья Лондоны предприняли попытку количественного описания электрических и магнитных свойств сверхпроводников. Предложенные ими уравнения имеют для сверхпроводников такое же зна-

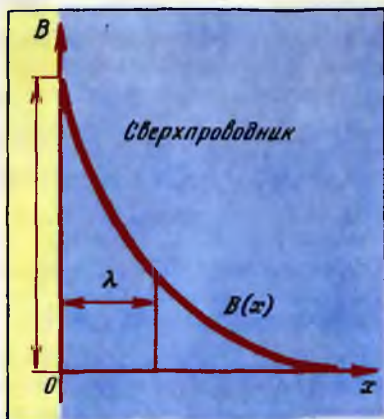
чение, какое имеет закон Ома для нормальных проводников. Для нормального проводника плотность тока  $j$  пропорциональна напряженности электрического поля  $E$ :  $j = \sigma E$  ( $\sigma$  — электропроводность).

Применим закон Ома ( $I = \frac{U}{R}$ ) к однородному проводнику длиной  $l$  и сечением  $S$ . Вследствие симметрии формы провода электрическое поле в нем имеет напряженность, равную  $E = \frac{U}{l}$ , а плотность тока  $j = \frac{I}{S}$ . Подставляя эти выражения в закон Ома, получим  $\frac{El}{jS} = R$ , откуда  $j = \frac{lE}{RS} = \frac{E}{\rho}$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника, равное  $\rho = R \frac{S}{l}$ , а  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  — удельная электропроводность. Связь между плотностью тока и электрическим или магнитным полем для сверхпроводников дается двумя уравнениями Лондонов. Первое уравнение описывает идеальную проводимость: поле ускоряет электрон, движущийся в среде без сопротивления. Второе уравнение отражает эффект Мейснера. Оно описывает затухание магнитного поля в тонком поверхностном слое сверхпроводника и тем самым словно разрушает представление об идеальном диамагнетизме.

Вообще говоря, в этом нет ничего удивительного. Диамагнетизм сверхпроводников — это поверхностный эффект; магнитное поле не проникает в толщу образца. Однако оно не может быть вытолкнуто полностью из всего объема металла, включая его поверхность. Иначе на поверхности магнитное поле скачком уменьшится до нуля. Токовый слой не имел бы толщины, и плотность тока была бы бесконечной, что физически невозможно. Следовательно, магнитное поле хоть немного, но проникает в сверхпроводник. Именно в этом тонком приповерхностном слое и протекают незатухающие токи, которые и экранируют от влияния внешнего магнитного поля области, удаленные от поверхности. Толщина этого слоя, получившая название *глубины проникновения поля*  $\lambda$ , является одной из важнейших характеристик сверхпроводника.

Таким образом, хотя мы и говорим, что сверхпроводник является идеальным диамагнетиком, на самом деле магнитное поле слегка в него проникает. Теория Лондонов позволила найти зависимость индукции магнитного поля от глубины проникновения:  $B(x) = B_0 e^{-x/\lambda}$ . Эта зависимость экспоненциальна, она показана на рисунке 8.

Конечно, все металлы имеют разные значения  $\lambda$ , но, в общем, глубина проникновения очень мала, порядка нескольких сот ангстрем ( $\text{Å}$ ) ( $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ см}$ ), поэтому и кажется, что массивные образцы ведут себя как идеальные диамагнетики с индукцией  $B = 0$ . Но вот на маленьких образцах (таких, как порошки или тонкие пленки), размеры которых сравнимы с глубиной проникновения магнитного поля, «неидеальность» сверхпроводников становится заметной. В их толще наблюдается весьма существенный магнитный поток, и свойства их значительно отличаются от свойств массивных образцов. Но самое интересное в том, что с уменьшением размеров испытуемого образца увеличивается его критическое магнитное поле. Так, у



сверхпроводящей свинцовой пленки при толщине 20 Å критическое поле становится равным 40 Тл!

Глубина проникновения не является постоянной величиной — она зависит от температуры образцов. Зависимость эта выглядит примерно так, как показано на рисунке 9. Чем больше температура отличается от критической, тем на меньшую глубину в образце проникает магнитное поле. По мере приближения к температуре перехода магнитное поле все глубже проникает в толщу образца, пока наконец в самой точке перехода в нормальное состояние не захватит весь объем образца. Вблизи критической температуры сверхпроводники уже не являются идеальными диэлектриками.

## О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Разговор о том своеобразии электромагнитных свойств, которое отмечается в экспериментах при изучении сверхпроводящего состояния вблизи точки перехода, заставил нас задеть тему, которая сама по себе имеет огромную важность. Речь идет о процессах, при которых происходит смена одного состояния вещества на другое — одной фазы на другую.

Дело в том, что почти во всех телах вблизи определенных температур свойства тел изменяются не плавно, а скачком. Такое скачкообразное изменение носит название *фазового перехода*; например, это может быть переход пар — жидкость, жидкость — твердое тело. При подобных переходах, называемых *фазовыми переходами I рода*, все свойства изменяются скачком: и плотность, и порядок в расположении атомов, и теплоемкость, и коэффициент теплового расширения... При этом фазы, расположенные слева и справа от точки перехода, мало похожи между собой. Одна фаза сменяет другую потому, что она энергетически более выгодна. Чтобы переход произошел, надо преодолеть *потенциальный барьер*, разделяющий фазы. По-



этому фазовые переходы I рода сопровождаются, как правило, поглощением или выделением тепла.

Но бывают переходы и другого типа, при которых отсутствует выделение (или поглощение) тепла, нет скачка объема или изменения в расположении атомов, т. е. в известном смысле превращение можно считать непрерывным. Однако в точке перехода наблюдаются скачки теплоемкости и других физических величин, а вблизи точки перехода многие из этих величин ведут себя аномально. Такие переходы получили название фазовых переходов II рода. При таком переходе в точке перехода, когда температура  $T = T_k$ , одна из фаз перестает существовать и ее сменяет другая фаза. При температуре  $T = T_k$  фазы неотличимы,

но если сдвинуться из этой точки, то различие фаз нарастает. Так, с удалением в сторону низких температур от температуры сверхпроводящего перехода растет число электронов, движущихся без сопротивления. При этом, как показали исследования, объем образца (расстояния между атомами) и тип кристаллической решетки остаются практически неизменными.

Еще в 1932 г. Кеезом наблюдал резкий скачок теплоемкости олова при переходе в сверхпроводящее состояние (рис. 10), однако теплота перехода отсутствовала, если отсутствовало магнитное поле.

Стало ясно, что сверхпроводящий переход при отсутствии магнитного поля представляет собой фазовый переход II рода. В магнитном же поле наблюдается переход I рода, при котором переход вещества из сверхпроводящего состояния S в нормальное N связан с поглощением тепла и, наоборот, переход из состояния N в состояние S — с выделением тепла.

Фазовые переходы служат прекрасными примерами предельных ситуаций, углубляясь в которые можно многое понять о сущности соседствующих состояний вещества, в нашем случае нормального и сверхпроводящего.

Степень развития новой фазы или степень ее отличия от первоначальной характеризуется так называемым параметром упорядочения или параметром порядка. Принимают, что этот параметр равен нулю и возрастает по мере охлаждения и удаления от точки перехода.

Так, для описания сверхпроводящего перехода в качестве параметра упорядочения было предложено использовать отношение числа сверхпроводящих электронов к полному числу электронов проводимости. При критической температуре это отношение обращается в нуль, а с понижением температуры возрастает: все большая доля электронов принимает участие в сверхпроводимости.

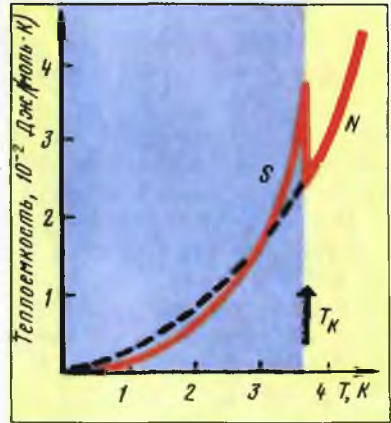


Рис. 10

## ДВА ТИПА ЭЛЕКТРОНОВ

Многие свойства сверхпроводников можно объяснить, если предположить, что при температуре ниже температуры перехода электроны проводимости делятся на два типа. Одни ведут себя как «сверхпроводящие» электроны — они могут проходить через металл без сопротивления, другие, «нормальные» электроны могут рассеиваться и испытывать сопротивление точно так же, как электроны проводимости в нормальном металле.

Вот и выходит, что сверхпроводник при температуре ниже температуры перехода как бы пропитан двумя электронными жидкостями: одна состоит из «нормальных» электронов, а другая — из «сверхпроводящих». С понижением температуры «сверхпроводящий» компонент возрастает, плотность же «нормальной» электронной жидкости убывает и при температуре  $T = 0$  обращается в нуль. В точке же фазового перехода, где температура  $T = T_c$ , исчезает «сверхпроводящая» часть электронной жидкости и все электроны становятся «нормальными» — металл теряет сверхпроводящие свойства.

Пусть только не возникает у читателя впечатление о реальном делении всей электронной системы металла на две части: «нормальную» и «сверхпроводящую». Каждый отдельно взятый электрон не может быть ни «нормальным», ни «сверхпроводящим» — мы не случайно ставим эти слова в кавычки.

Сверхпроводимость представляет собой коллективный эффект, и правильнее говорить не о двух частях электронной жидкости, а о двух типах движений, которые могут существовать.

Подход, основанный на «двухжидкостной» модели сверхпроводящего состояния, оказался весьма плодотворным. Этим удалось объяснить, по крайней мере качественно, довольно сложные данные эксперимента, в частности особенности теплопроводности в сверхпроводниках. Если в нормальном металле число электронов, участвующих в теплопередаче, не меняется при изменении температуры, то в сверхпроводниках ответственный за теплопроводность «нормальный» компонент уменьшается с понижением температуры.

Уменьшение числа переносящих энергию носителей с температурой естественно приводит к уменьшению электронной составляющей теплопроводности, что и соответствует опыту.

С наличием двух типов электронов в сверхпроводнике физики связывают и эффект Мейснера. Каждому из них, считают они, соответствует своя электродинамика. «Нормальные» электроны должны удовлетворять основным уравнениям электродинамики, реагируя на приращение магнитного поля; «сверхпроводящие», напротив, реагируют на абсолютную величину этого поля, что формально отражается вторым уравнением Лондонов.

Словом, «двухжидкостная» модель — удобный метод, позволяющий наглядно представлять сложные процессы, происходящие в веществе, находящемся в сверхпроводящем состоянии.

## ЕЩЕ РАЗ ОБ ЭФФЕКТЕ МЕЙСНЕРА

Многие считают, что эффект Мейснера является наиболее фундаментальным свойством сверхпроводников. Действительно, существование нулевого сопротивления неизбежно следует из этого эффекта. Ведь поверхностные экранирующие токи постоянны во времени и не затухают в неизменяющемся магнитном поле. В тонком поверхностном слое сверхпроводника эти токи создают свое магнитное поле, строго равное и противоположное внешнему полю. В сверхпроводнике эти два встречных магнитных поля складываются так, что суммарное магнитное поле становится равным нулю, хотя слагаемые поля существуют совместно. Поэтому и говорят об эффекте «выталкивания» внешнего магнитного поля из сверхпроводника.

Но выталкивание магнитного поля из объема образца энергетически невыгодно. Ведь на возбуждение поверхностных токов тратится определенная энергия. Подсчитали, что при переходе металла из нормального состояния в сверхпроводящее производится некоторая работа. Что, собственно, является источником этой работы? То, что у сверхпроводника энергия ниже, чем у того же металла в нормальном состоянии.

Ясно, что «роскошь» эффекта Мейснера сверхпроводник может себе позволить за счет выигрыша в энергии. Выталкивание магнитного поля будет иметь место до тех пор, пока связанное с этим явлением увеличение энергии компенсируется более эффективным ее уменьшением, связанным с переходом металла в сверхпроводящее состояние. В достаточно сильных магнитных полях энергетически более выгодным оказывается не сверхпроводящее, а нормальное состояние, в котором поле свободно проникает в образец.

## ПРЕРЫВНОЕ В НЕПРЕРЫВНОМ

Рассказав о действии магнитного поля на сверхпроводники, мы не упомянули еще о целом ряде важных обстоятельств, существенно дополняющих нарисованную нами картину. Вот мы говорили, что по достижении критического значения магнитного поля сверхпроводимость скачком разрушается и образец целиком переходит в нормальное состояние. Это справедливо и тогда, когда внешнее магнитное поле имеет одно и то же значение в любой точке на поверхности образца. Такая простая ситуация может быть реализована, в частности, для очень длинного и тонкого цилиндра с осью, направленной вдоль поля.

Если же образец имеет иную форму, то картина перехода в нормальное состояние во внешнем магнитном поле выглядит намного сложнее. С ростом поля наступает момент, когда оно становится равным критическому в каком-нибудь одном месте поверхности образца. Например, если образец имеет форму шара, то выталкивание магнитного поля приводит, как это видно из рисунка 11, к сгущению силовых линий в окрестности его экватора. Такое распределение поля является результатом наложения на равномерное

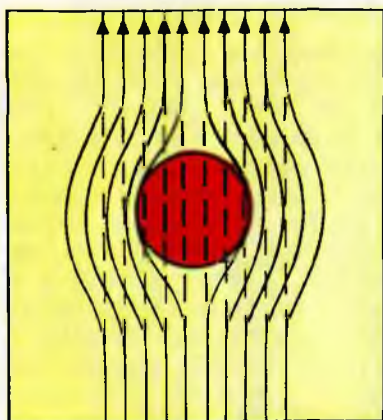


Рис. 11

внешнее магнитное поле с индукцией  $B_0$  магнитного поля, создаваемого экранирующими токами. Очевидно, распределение силовых линий магнитного поля обусловлено геометрией образца. Для простых тел этот эффект можно характеризовать одним числом, так называемым коэффициентом размагничивания. Если, например, тело имеет форму эллипсоида, одна из осей которого направлена вдоль поля, то на его экваторе поле становится равным критическому при выполнении условия  $B_0 = B_k \cdot (1 - N)$ . При известном коэффициенте размагничивания  $N$  можно определить поле на экваторе. Для шара, например,  $N = 1/3$ , так что на экваторе его магнитное поле становится критическим при индукции  $B_0 = 2/3 B_k$ . При дальнейшем увеличении поля сверхпроводимость у экватора должна разрушиться. Однако весь шар не может перейти в нормальное состояние, так как в этом случае поле проникло бы внутрь шара и стало бы равно внешнему полю, т. е. оказалось бы меньше критического. Наступает частичное разрушение сверхпроводимости — образец расслаивается на нормальные и сверхпроводящие области. Такое состояние, когда в образце существуют одновременно и сверхпроводящие и нормальные области, называется *промежуточным*.

Теория промежуточного состояния была разработана Л. Д. Ландау. Согласно этой теории в интервале магнитных полей с индукцией  $B_1 < B_0 < B_k$  ( $B_1$  — индукция внешнего магнитного поля, в тот момент, когда в каком-нибудь месте поверхности поле достигает значения индукции  $B_k$ ) сверхпроводящие и нормальные области сосуществуют, образуя совокупность чередующихся между собой зон разной электропроводности. Идеализированная картина такого состояния для шара изображена на рисунке 12, а. Реальная картина намного сложнее. Структура промежуточного состояния, полу-

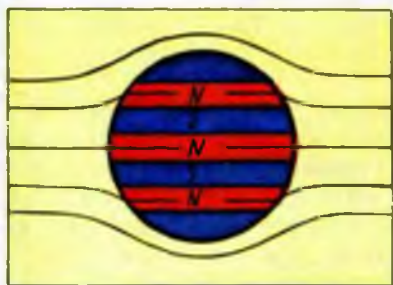


Рис. 12

а)



б)

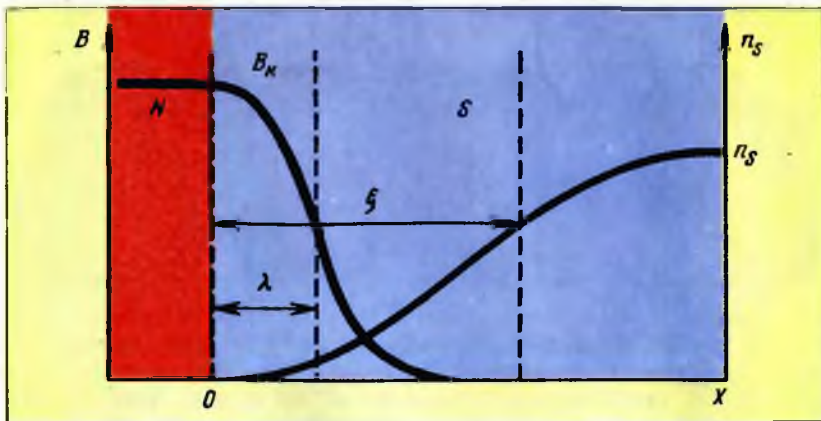


Рис. 13

ченная при исследовании оловянного шара, показана на рисунке 12, б (сверхпроводящие области заштрихованы). Не надо думать, что картина эта статична. Соотношение между количествами S- и N-областей непрерывно меняется. С ростом поля сверхпроводящая S-фаза «тает» за счет роста N-областей и при индукции  $B=B_k$  исчезает полностью. И все это, заметьте, связано с образованием и исчезновением границ между S- и N-областями. А образование всякой поверхности раздела между двумя различными состояниями должно быть связано с дополнительной энергией. Эта поверхностная энергия играет весьма существенную роль и является важным фактором. От нее, в частности, зависит тип сверхпроводника.

На рисунке 13 схематически показана граница между нормальной и сверхпроводящей областями. В нормальной области слева магнитное поле равно критическому (или больше). На границе нет резкого перехода от полностью нормального состояния к полностью сверхпроводящему. Магнитное поле проникает на расстояние  $\lambda$  в глубь сверхпроводящей области, и число «сверхпроводящих» электронов  $n_s$  на единицу объема медленно повышается на расстоянии, равном некоторой характеристической длине, которую называют длиной когерентности  $\xi$ .

Глубина проникновения  $\lambda$ , как мы уже говорили, имеет порядок  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  см, а длина когерентности для чистых металлов, по оценкам английского физика А. Пиппарда, должна быть порядка  $10^{-4}$  см. Как показали советские физики В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау, поверхностная энергия будет положительной, если отношение  $\lambda/\xi$  меньше чем  $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ . Этот случай реализуется у веществ, которые принято называть *сверхпроводниками I рода*. Сверхпроводники первого рода, или *мягкие сверхпроводники*, как правило, это чистые металлы.

Итак, в сверхпроводниках I рода поверхностная энергия положительна, т. е. в нормальном состоянии выше, чем в сверхпроводящем. Если в толще такого материала возникает нормальная зона, то для создания гра-

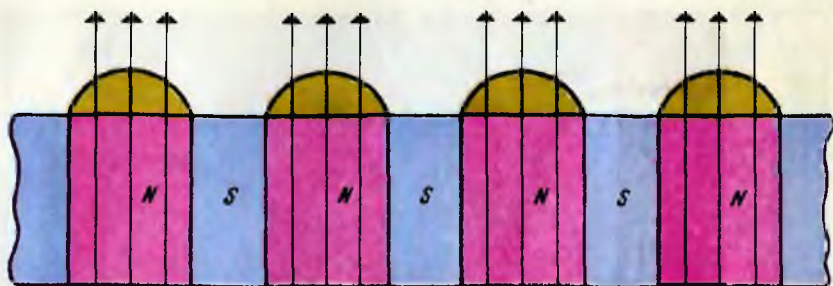


Рис. 14

ницы между сверхпроводящей и нормальной фазами необходима затрата некоторой энергии. Это и объясняет причину расслоения сверхпроводника в промежуточном состоянии только на конечное число зон. При этом размеры *S*- и *N*-областей могут быть порядка миллиметра, их можно видеть даже невооруженным глазом, покрывая поверхность образца тонким магнитным или сверхпроводящим (диамагнитным) порошком. Магнитные порошки притягиваются полем и располагаются на выходе нормальных слоев, как показано на рисунке 14.

Теперь о *сверхпроводниках II рода*. Промежуточное состояние соответствует ситуации, когда расстояние  $\lambda < \xi$ . Но могут быть вещества, у которых длина когерентности меньше глубины проникновения. Величина  $10^{-4}$  см соответствует только чистым металлам, для них поверхностная энергия всегда положительна. В неоднородных же металлах при наличии примесей дело обстоит иначе. Соударения электронов с атомами примеси могут привести к снижению длины когерентности  $\xi$ . В таких материалах, как сплавы, длина когерентности оказывается меньше, и порой существенно — в сотни раз, чем глубина проникновения. Таким образом, сверхпроводники II рода — это сплавы и металлы с примесями.

В сверхпроводниках II рода поверхностная энергия отрицательна ( $\lambda > \xi$ ), поэтому создание границы раздела между фазами связано с освобождением некоторой энергии. Всякое тело стремится понизить свою энергию, если есть для этого возможность, конечно. У сверхпроводников с отрицательной поверхностной энергией такая возможность есть. Им энергетически выгодно пропустить в свой объем часть внешнего магнитного потока. Вещество при этом распадается на некую смесь из мелких сверхпроводящих и нормальных областей, границы которых параллельны направлению приложенного поля. Такое состояние принято называть *смешанным*.

## ЕЩЕ ОДИН БАРЬЕР — КРИТИЧЕСКИЙ ТОК

Первые исследователи обнаружили: ток, протекающий по сверхпроводнику, при превышении им критического значения также может вызвать у него потерю сверхпроводимости. Значение этого тока в чистых металлах связано с критическим магнитным полем *правилом Сильсби*.

Еще в 1916 г. американец Сильсби высказал предположение, что сверхпроводимость уничтожается таким значением тока в проводнике, которое создает на поверхности сверхпроводника магнитное поле, равное критическому. При этом совершенно все равно, какое поле на него действует — собственное или приложенное внешнее.

Рассмотрим сверхпроводящую проволоку, по которой течет ток благодаря внешнему источнику. Физики называют этот ток током переноса, так как он переносит заряд по проволоке. Если проволока находится во внешнем магнитном поле, то возникшие на поверхности проводника экранирующие токи складываются с токами переноса и в каждой точке ток  $I$  можно рассматривать как суммарный. Магнитное поле на поверхности такой проволоки, через которую протекает ток  $I$ , определяется выражением  $B_0 = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}$ , где  $B_0$  — поле на поверхности,  $I$  — суммарный ток,  $R$  — радиус проволоки,  $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ . При этом неважно, возбужден ток внешним источником или наведен магнитным полем. Чтобы сверхпроводимость в какой-либо точке сохранилась, суммарный ток в ней не должен превысить критическую величину, присущую данному материалу.

Если полный ток, текущий по сверхпроводнику, достаточно высок, то плотность тока на поверхности достигнет критического значения и связанное с ним магнитное поле на поверхности станет равным критическому. Очевидно, чем сильнее внешнее магнитное поле, тем меньше ток переноса, который можно пропускать через сверхпроводник без возникновения в нем сопротивления.

Посмотрим теперь, каким образом происходит переход сверхпроводника в нормальное состояние при достижении критической силы тока.

Если ток течет по сверхпроводнику в присутствии внешнего магнитного поля, то здесь все зависит от того, как распределены в пространстве силовые линии собственного и внешнего магнитных полей. Если же внешнее магнитное поле отсутствует, то можно предположить, что при токе  $I_c$  в нормальное состояние переходит лишь внешний цилиндрический слой проволоки, а ее сердцевина — центральная часть — остается сверхпроводящей. Однако это оказывается невозможным.

Ток выбирает путь наименьшего сопротивления и, естественно, будет протекать по сердцевине проволоки, а не по внешнему цилиндрическому слою. Но, как известно, индукция магнитного поля обратно пропорциональна радиусу области, в которой идет ток. Вот и получается, что в центральной части магнитное поле будет больше, чем на поверхности проволоки. Если на поверхности поле достигает своего критического значения с индукцией  $B_c$ , то в центральной части оно становится больше критического и сверхпроводящая сердцевина должна уменьшить свой радиус. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока радиус не обратится в нуль, т. е. пока проволока не перейдет в нормальное состояние. Но вся проволока перейти в нормальное состояние еще не может: поле достигло критического значения лишь на ее поверхности. Поэтому, очевидно, при критическом токе

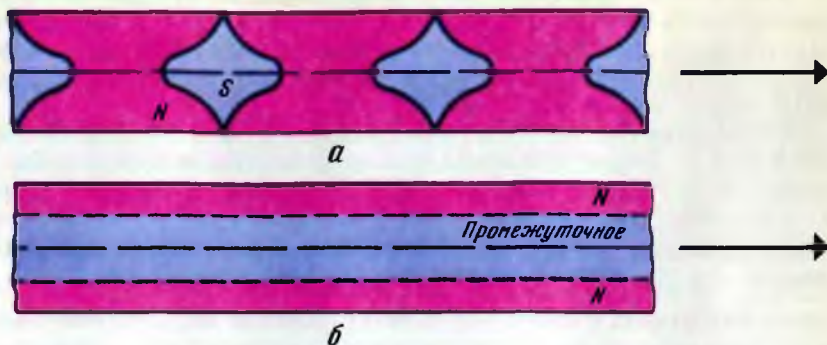


Рис. 15

проволока не может быть ни полностью сверхпроводящей, ни полностью нормальной. Сверхпроводник переходит в *промежуточное состояние* с чередующимися сверхпроводящими и нормальными слоями.

Для этого промежуточного состояния был предложен ряд моделей. Ф. Лондон, например, предположил, что при силе тока  $I > I_k$  промежуточное состояние сосредоточивается в сердцевине, окруженной нормальной оболочкой (рис. 15, а). По мере возрастания тока толщина этой оболочки растет, а сопротивление проволоки соответственно плавно увеличивается от нуля до нормального значения.

Позже была предложена другая модель, согласно которой чередование нормальных и сверхпроводящих областей происходит вдоль всей проволоки. Схематически такая структура изображена на рисунке 15, б. По мере возрастания тока сверхпроводящие области все более сжимаются (это показано на рисунке штриховыми линиями), пока наконец не исчезают полностью.

Что же можно сказать о величине токов, которые можно передавать по сверхпроводнику? Этот вопрос имеет важное значение для технических применений сверхпроводников.

В сверхпроводниках I рода — чистых металлах — ток протекает в очень тонком поверхностном слое, и с увеличением диаметра проводника средняя плотность тока, отнесенная ко всему практически не работающему сечению, уменьшается. Например, в свинцовой проволоке диаметром 1 мм, охлажденной в жидком гелии до 4,2 К, критическая плотность тока достигает  $10^8$  А/мм<sup>2</sup>, а при диаметре 20 мм снижается до 8,5 А/мм<sup>2</sup>, что уже почти соизмеримо с медью. Кроме того, чистые металлы сохраняют сверхпроводимость лишь в сравнительно слабых магнитных полях ( $B_k \approx 0,01 - 0,1$  Тл).

Таким образом, сверхпроводники I рода в основном можно использовать в устройствах со слабым магнитным полем и низкой плотностью тока. В электроэнергетике и в системах с высокими магнитными полями, где от сверхпроводимости следует ожидать наибольшей выгоды, такие материалы непригодны. Здесь вне конкуренции сверхпроводники II рода. Они не только более стойко ведут себя во внешних магнитных полях и при более высоких



температурах, но и токи могут пропускать существенно более высокие. Некоторые сплавы и химические соединения выдерживают поля до 20 Тл при достаточно высоких плотностях токов переноса, проводимых уже не только поверхностно, но и всей толщей проводника.

## АБРИКОСОВСКИЕ ВИХРИ

Сверхпроводники II рода характеризуются весьма своеобразными электромагнитными свойствами. Очень любопытной является картина проникновения магнитного поля в толщу такого образца.

Еще в 1936 г. советский физик Л. В. Шубников, экспериментируя со сверхпроводящими сплавами, обнаружил, что магнитное поле проникает в образец, который частично все еще остается сверхпроводящим. Значение поля, при котором начинается проникновение, получило название нижнего или *первого критического магнитного поля* с индукцией  $B_{к1}$ , а при втором — *верхнем критическом значении* магнитного поля с индукцией  $B_{к2}$  сверхпроводимость полностью исчезает во всем образце. В промежутке между этими значениями полей эффект Мейснера проявляется не полностью и сверхпроводник находится в особом *смешанном состоянии*.

---

Очень важно отличать *смешанное состояние* сверхпроводников II рода от *промежуточного состояния* сверхпроводников I рода. Между ними нет ничего общего. Промежуточное состояние зависит от формы образца и расположения его относительно магнитного поля и возникает далеко не всегда. Смешанное же состояние является внутренним свойством сверхпроводников II рода; оно обусловлено самой их природой и возникает всегда в образцах любой формы, как только магнитное поле достигает значения этого состояния.

Возможность реализации такого состояния в сверхпроводящих сплавах была предсказана еще в 1952 г. советским физиком А. А. Абрикосовым. Позднее, в 1957 г., им был произведен детальный расчет и разработана *теория смешанного состояния*. Оказалось, что проникновение магнитного поля внутрь сверхпроводника связано с образованием в том сверхпроводнике особой *нитевидной структуры*. При частичном проникновении магнитного поля в толщу сверхпроводящего образца электроны под действием силы Лоренца начинают двигаться по окружностям, образуя своеобразные вихри. Их так и называют — *абрикосовские вихри*. Внутри вихря скорость вращения электрона возрастает по мере приближения к оси вихря, и на некотором расстоянии от нее происходит «срыв» сверхпроводимости. Внутри каждого вихря сверхпроводимость разрушена, но в пространстве между ними она сохраняется.

В результате сверхпроводящий образец оказывается пронизан вихревыми нитями, представляющими собой тонкие несверхпроводящие области

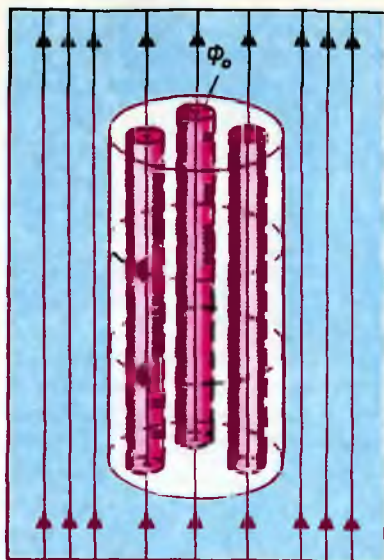


Рис. 16

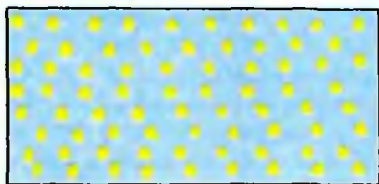


Рис. 17

цилиндрической формы, ориентированные в направлении силовых линий магнитного поля (рис. 16). По этим нитям-цилиндрикам магнитное поле и проникает в сверхпроводник.

Здесь нельзя не отметить одного чрезвычайно важного обстоятельства. Дело в том, что величина магнитного потока в каждом цилиндрике не произвольна, а равна определенному значению; значению порции магнитного потока  $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$  Вб. Величина  $\Phi_0$  называется *квантом магнитного потока*. Чем больше внешнее магнитное поле, тем больше таких нитей-цилиндров, а следовательно, больше квантов магнитного потока проникает в сверхпроводник. Поэтому магнитный поток в сверхпроводнике меняется не непрерывно, а скачком, дискретно. Обычно дискретность физических величин проявляется в микромире. Там многие физические величины могут принимать только определенные значения, как говорят физики: *величины квантуются*. В больших коллективах — макроскопических телах — квантовые эффекты обычно перестают быть заметными, поскольку из-за хаотичного теплового движения происходит усреднение величины по большому числу ее различных значений и квантовые «скачки» замазываются.

Иное дело — низкие температуры. Вблизи абсолютного нуля, когда тепловое движение не играет значительной роли, мы сталкиваемся с удивительным явлением — законы квантовой механики начинают работать в макроскопических масштабах. Пример тому — квантование магнитного потока в сверхпроводнике. Именно в виде квантов магнитного потока — *флюксоидов* — магнитное поле проникает внутрь сверхпроводника.

При увеличении магнитного поля вихревые нити сближаются, плотность их увеличивается, и при некотором значении поля, когда расстояние между нитями становится примерно  $10^{-4}$  см, сверхпроводимость разрушается и образец переходит в нормальное состояние.

Такая необычная картина разрушения сверхпроводимости в сплавах была открыта «на кончике пера». Однако современная экспериментальная техника позволяет наблюдать абрикосовские вихри непосредственно. Для этого на поверхность образца наносят тончайший магнитный порошок. Частицы скапливаются в тех областях, куда проникло магнитное поле.

Размеры каждой области невелики и обычно составляют миллионные доли метра. Если посмотреть на поверхность в электронный микроскоп, то видны темные пятна.

Структура абрикосовских вихрей, полученная таким способом, показана на рисунке 17. Видно, что вихри расположены периодически и образуют решетку, аналогичную кристаллической. Вихревая решетка треугольная (ее можно составить из повторяющихся правильных треугольников).

## ...И ЯСНЕЕ ВЫРИСОВЫВАЕТСЯ КАРТИНА

Итак, мы познакомились с основными свойствами сверхпроводников, с историей их открытия и изучения. Мы выяснили много важного и интересного и теперь понимаем, что в понятие «сверхпроводник» вкладывают смысл гораздо более глубокий, чем просто понятие о веществе, способном проводить ток, не оказывая ему ни малейшего сопротивления.

Конечно, мы коснулись лишь самой поверхности явления — за ней скрываются сложнейшие особенности законов движения и взаимодействия частиц, составляющих вещество. Однако уже эта внешняя сторона дает нам представление об особом характере сверхпроводящего состояния, физические свойства которого во многих отношениях отличаются от свойств обычного металла.

К 50-м годам нашего столетия сверхпроводимость была обнаружена у многих металлов и у еще большего числа сплавов и соединений. Сплавы были изучены слабее и основное внимание уделялось экспериментам на чистых металлах как на объектах более простых и доступных более корректному описанию.

К тому времени физики уже многое узнали о строении и свойствах металлов, о происходящих в них явлениях. Были выявлены многие важные закономерности. Стало ясно, что теория Лондонов нуждается в уточнении. Вместе с тем стало ясно и другое: понять и обосновать наблюдаемые закономерности можно только при помощи законов *квантовой механики* — законов микромира. Тем самым было задано верное направление научной мысли. Идеи квантовой механики позволили раскрыть многие «как» и «почему», оставшиеся без ответа в классической физике, а главное, сыграли огромную стимулирующую роль. Под влиянием этих идей было выполнено большое количество экспериментальных работ, которые не только значительно расширили существующие представления о сверхпроводимости, но и существенно их изменили.

К рассказу о том, что здесь удалось достигнуть, мы сейчас и перейдем.



Мы тогда уверены в познании всякой вещи, когда узнаем ее первые причины, первые начала и разлагаем ее вплоть до элементов.

*Аристотель*

В науке нередко бывает так. Наблюдают ученые какое-нибудь явление, которое пока непонятно. Выдвигают гипотезу (или предположение), что это явление обусловлено такими-то и такими-то причинами. А главное, стремятся хотя бы правильно описать новое явление — установить математические соотношения между измеряемыми величинами. Иными словами, стремятся перевести рассуждения на строгий язык уравнений и формул. Естественно, при этом добиваются того, чтобы исходных соотношений было поменьше, а выводов побольше.

Здесь сразу же возникает много трудностей, и, чтобы преодолеть их на таком предварительном этапе, в общую теорию вносят какие-то дополнительные «разумные» предположения специально для описания данного явления.

Так возникает *феноменологическая*, т. е. описательная, теория — теория, описывающая феномен (явление), а не объясняющая его. Такой была, например, теория Лондонов. Уравнения Лондонов, как мы знаем, — это ограничения, наложенные на обычные уравнения электромагнетизма и введенные с тем, чтобы свойства, полученные на основании этих законов, согласовывались с результатами опытов.

При таком способе описания детали строения твердого тела (металла) не принимаются во внимание: полученные выводы попросту не нуждаются в них.

Но любое твердое тело — совокупность огромного числа частиц. Чтобы описать и объяснить все многообразие свойств и поведения твердых тел, нужно знать и свойства этих частиц, и то, как они расположены, как взаимодействуют между собой и с внешними электромагнитными полями и как они движутся.

В этом сущность *микроскопического* подхода. И как следствие такого подхода возникает физическая картина, в которой центральное место отводится структурным единицам твердых тел — атомам и частицам. Появляется нечто существенное, часто вовсе не сводимое к привычным для мира «больших вещей» наглядным аналогиям. Здесь выступают на сцену своеобразные, особые законы микромира — законы квантовой механики. Вся современная физика твердого тела — это, по сути дела, квантовая физика.

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ — ЯВЛЕНИЕ КВАНТОВОЕ

Квантовая теория объяснила существование диэлектриков, полупроводников и металлов, установила природу магнетизма, дала, наконец, ключ к отгадке тайны сверхпроводимости.

Уже в 1930 г. стало очевидно, что сверхпроводимость должна быть типично квантовым эффектом. Однако до современного понимания сверхпроводимости было еще далеко. Несомненно, одна из трудностей состояла в том, что квантовые эффекты обычно рассматривались в атомарных, но отнюдь не в макроскопических масштабах. На примере сверхпроводимости можно заметить, что законы квантовой механики при низких температурах непосредственным образом управляют поведением макроскопических тел в целом, а не только микроскопическими системами — атомами и молекулами. Низкие температуры образуют как бы мост между квантовой механикой и физикой макроскопических тел — мост, полезный и для науки, и для практических целей.

### ЖИВОЙ КРИСТАЛЛ

Если в самых общих чертах попробовать представить себе строение твердых тел (а твердые тела в основном кристаллы), то можно нарисовать следующую картину: огромная совокупность одинаковых атомов или молекул, которые во всех трех измерениях расположены в строгом порядке, образуя кристаллическую решетку.

Эта строгая пространственная периодичность в структуре кристалла — характерная его черта. Кристалл — это символ порядка. Конечно, в реальном кристалле в некоторых местах этот строгий порядок нарушается по тем или иным причинам, и эти нарушения означают наличие дефектов. И еще одна характеристика кристалла: образующие его атомы между собой взаимодействуют. Это и понятно, потому что если бы они не взаимодействовали, то был бы не кристалл, а газ, состоящий из беспорядочно движущихся атомов.

Посмотрите на рисунок 18. Он, пожалуй, не нуждается в объяснениях. Так принято изображать кристаллическую решетку. Эта схема лежит в основе моделей твердого тела. Но модель эта «мертвая»: в ней нет никаких видов движения. Конечно, атомы твердых тел столь сильно влияют друг на друга, что практически лишены возможности перемещаться. Однако существуют признаки «жизни кристалла». Если кристалл находится при некоторой конечной температуре, то составляющие его атомы обязаны совершать тепловые колебания. Атомы не в силах разорвать их связь с

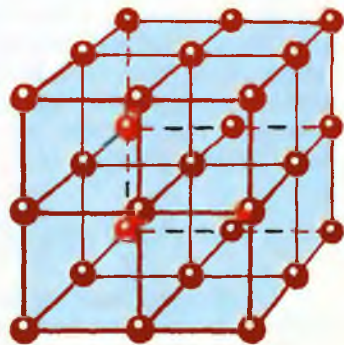


Рис. 18

ближайшими соседями, и обречены совершать только бег на месте, они напоминают движение маятника. Иногда они раскачиваются столь сильно, что покидают свое положение равновесия, но это происходит редко.

Атомы движутся всегда, причем, чем выше температура, тем больше размах, или, как говорят физики, амплитуда их колебаний. Но, пожалуй, самое существенное отличие атома, колеблющегося вокруг положения равновесия, от обычного «классического маятника» состоит в том, что атом — «квантовый маятник». В отличие от «классического маятника» «квантовый» может менять свою энергию лишь порциями, квантами. Закономерность, передающая непрерывность связи между величинами, несостоятельна. Микромир проявляет здесь удивительную категоричность: энергия «квантового маятника» квантуется на порции, величина которых равна  $\Delta E = h\nu$ , где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка, а  $\nu$  — частота, с которой колеблется маятник. Таким образом, последовательность значений энергии, которую может иметь атом, колеблющийся вокруг положения равновесия, образует как бы «энергетическую лесенку», ступеньки которой отстоят друг от друга на расстоянии  $\Delta E$ . При комнатной температуре ( $T = 300$  К) величина  $\Delta E$  близка к  $kT$  полной энергии колеблющегося атома, и поэтому квантовость поглощения энергии атомом не может не сказаться и на его «личных» характеристиках, и на характеристиках твердого тела, состоящего из совокупности атомов — «квантовых маятников».

Идеи квантового описания внесли и новые подробности. С классической точки зрения амплитуда колебаний будет уменьшаться, и при абсолютном нуле атомы вовсе останутся. Но вот с точки зрения квантовых законов оказывается, что даже при абсолютном нуле атомы в твердом теле совершают колебания. Их так и называют — *нулевые колебания атомов*.

Нулевые колебания атомов — один из непреходящих признаков жизни кристалла. Они происходят и при иной, более высокой температуре, одновременно с обычными колебаниями классического маятника, которые при нулевой температуре должны прекратиться. Эти колебания замирают, а нулевые остаются. Они неуничтожаемы! Они существуют, пока есть кристалл.

Нулевые колебания обнаруживают себя во многих физических явлениях, главным образом в так называемых «квантовых кристаллах», у которых амплитуда нулевых колебаний близка к межатомному расстоянию и даже превосходит его. Это кристаллы, для которых характерна малая энергия связи, и существуют они в области низких температур. Благодаря активным нулевым колебаниям эти кристаллы обладают многими удивительными свойствами, которые сейчас интенсивно исследуются.

## НЕ МАЯТНИК, А ВОЛНЫ

Теперь нам предстоит познакомиться с одним из основных представлений современной теории твердого тела.

Колебания сильно взаимодействующих атомов можно представить как совокупность слабо взаимодействующих волн. В основе такого перехода

лежит идея (ее сформулировал еще в 1923 г. французский физик Луи де Бройль) о том, что каждой волне можно сопоставить частицу, энергия которой равна  $E = h\nu = \frac{h\nu}{\lambda}$ , где  $\nu$  — скорость распространения волны, а  $\lambda$  — ее длина. Это обстоятельство позволяет создать удобный и наглядный язык для описания поведения атомов твердого тела, язык, особенно пригодный при низких температурах.

Для иллюстрации рассмотрим с позиций квантовой механики типичную ситуацию, возникающую в кристалле. Кристалл — совокупность правильно расположенных, взаимодействующих друг с другом атомов. Все эти атомы подобны колебательным контурам, настроенным на одинаковые частоты и способным резонировать друг с другом. Поэтому любое возбуждение одного атома вызывает аналогичные возбуждения атомов-соседей.

Представьте себе систему шариков, связанных между собой пружинками, как это показано на рисунке 19. Как только мы качнем один шарик, он сдвинет с места соседний, тот столкнет своего соседа и т. д. По системе шариков и пружин побежит волна. Эти волны очень хорошо иллюстрируют движение атомов в твердом теле. Из-за взаимодействия атомы не могут двигаться независимо друг от друга. Возбуждения распространяются в кристалле в виде волны. Однако согласно законам квантовой механики движение, которое связано с этими волнами, возникает и передается только в виде отдельных порций-квантов. Такие кванты, связанные с коллективным возбуждением всего кристалла, как это ни парадоксально, ведут себя во многих отношениях подобно обычным частицам. Они получили название «квазичастицы» (почти частицы).

Квазичастицы являются носителями движения в системе взаимодействующих

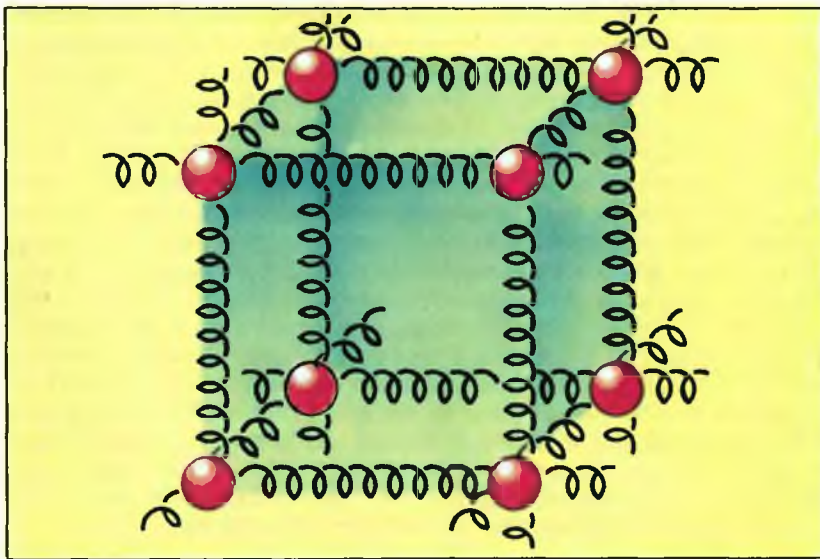


Рис. 19

щих атомов в том смысле, что энергия твердого тела равна сумме энергий отдельных квазичастиц. Квазичастица — одно из фундаментальных представлений современной теории твердого тела. К образу квазичастицы физики прибегают при описании практически всех свойств твердых тел: тепловых, электрических, магнитных.

## ЗВУКОВОЙ КВАНТ — ФОНОН

Коллективные колебания громадного числа частиц, составляющих твердое тело, — это то же самое, что звуковые волны. Если вывести любой атом из положения равновесия, то возмущение будет распространяться по телу со скоростью звука. Стало быть, тепловое движение в твердом теле можно рассматривать как распространение звуковых волн. Но всякая волна состоит из квантов. У световой волны это *фотоны*, у звуковой — это *фононы*.

Фотоны — самые настоящие частицы, вполне равноправные с другими элементарными частицами. Фононы не совсем равноправны в том смысле, что они способны существовать только внутри вещества (в пустоте фононов не может быть). Фонон — квази, а не настоящая частица. Настоящую материализованную частицу можно было бы изъять из кристалла и поселить где-нибудь в ином месте, например в ином кристалле. А вот «выпустить» фонон из кристалла нельзя, ведь фонон — это движение атомов кристалла. С этой точки зрения твердое тело можно уподобить ящику, заполненному *фононным газом* — газом квазичастиц. Фононы, как частицы обычного газа, движутся от стенки к стенке, сталкиваются друг с другом и с электронами. Здесь обнаруживается неожиданная связь между электрическим сопротивлением и звуком. Мы как бы возвращаемся к простому объяснению сопротивления: электронам мешают свободно двигаться их столкновения с другими частицами. Но только не с частицами вещества, а со звуковыми квантами — фононами. Электроны рассеиваются на фононах, возбуждаемых при тепловом движении кристаллической решетки. Фононов тем больше, чем интенсивнее тепловое движение атомов, т. е. чем выше температура. Следовательно, если сопротивление вызвано столкновением электронов с фононами, то оно тоже должно быть пропорционально температуре! Но это справедливо только при достаточно высоких температурах. Ведь по смыслу квантовой теории число фононов не может быть меньше единицы. Температуру, при которой оно становится равным единице, называют температурой Дебая и обозначают буквой  $\Theta$ . Температура Дебая играет очень важную роль в физике твердого тела. Величина  $T/\Theta$  является мерой числа фононов в кристалле, а следовательно, и числа столкновений электронов с фононами.

Заметим, что фонон — это лишь один из представителей обширной семьи квазичастиц. Мир квазичастиц многообразен, так как огромно разнообразие коллективных движений, порождающих эти квазичастицы. Типичные квазичастицы, например, электроны проводимости. По своим свойствам они чрезвычайно существенно отличаются от обычных электронов.



## ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ В МЕТАЛЛЕ

Еще с конца прошлого века было известно, что в металле (в отличие от диэлектриков) есть *свободные* электроны — свободные в том смысле, что они не «привязаны» к определенному атому, а движутся по всему кристаллу. Таких электронов в металле много: в  $1 \text{ см}^3$  металлического кристалла содержится приблизительно  $10^{23}$  (единица с 23 нулями!) электронов. Все эти электроны ведут себя как молекулы обычного идеального газа. Металл в рамках этой модели представляется как некий жесткий каркас из ионных остовов, погруженный в *электронный газ*.

Итак, металлический кристалл «пропитан» электронным газом огромной плотности. Легко понять, что наличие такого газа — необходимое условие существования металлического кристалла. Благодаря ему весь металл нейтрален, и силы отталкивания уравниваются силами притяжения. Ведь если бы могли удалить свободные электроны из металла, «выдуть» их из решетки, ионы, оставшиеся в узлах, имея одинаковые заряды, под влиянием кулоновского отталкивания разлетелись бы прочь друг от друга. Решетка «взорвалась» бы и перестала существовать. Электронный газ в металле как бы скрепляет решетку, состоящую из взаимно отталкивающихся ионов.

## ЭЛЕКТРОНЫ ДВИЖУТСЯ В МЕТАЛЛЕ

Электроны в металле не только «скрепляют» ионы, они также (и это, пожалуй, главное для нас их свойство) переносят электрический заряд, обеспечивая электропроводность металла. Благодаря движению электронов под действием приложенной к металлу разности потенциалов, которая создает в металле электрическое поле, через металл течет ток.

Надо сказать, что электроны в металле движутся и в отсутствие поля, и притом с немалыми скоростями, около  $10^6 \text{ м/с}$ . Но это движение хаотичное, напоминающее беспорядочное движение людей в толпе на улице; их средняя скорость в любом направлении равна нулю. Этим объясняется тот факт, что в металле, содержащем громадное число электронов проводимости, в отсутствие внешнего электрического поля ток не возникает. Когда же к металлу приложена некоторая разность потенциалов, то на каждый электрон со стороны электрического поля действует ускоряющая сила  $F = eE$  ( $e$  — заряд электрона). Под действием этой силы электрон приобретает направленное движение. Теперь уже картина напоминает беспорядочное движение людей в толпе, которая медленно движется в каком-то направлении. Медленно, потому что скорость упорядоченного движения намного меньше скорости хаотичного, настолько, что невольно закрадывается подозрение: имеем ли мы право считать электроны металла свободными? И если да, то в какой степени?

На первый взгляд ответ на этот вопрос представляется довольно простым. Ведь электроны движутся не в пустом пространстве, а в кристалле. Они

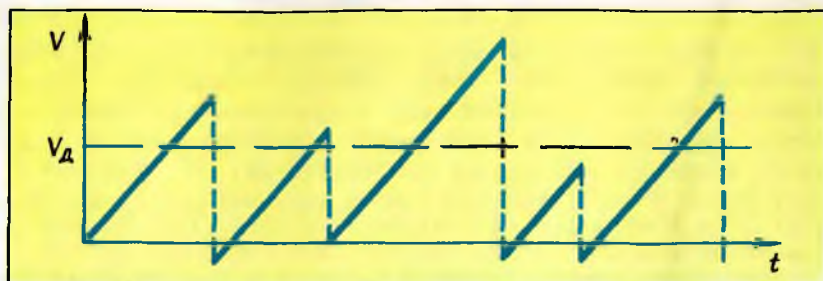


Рис. 20

должны испытывать силу сопротивления среды, через которую движутся. Не будь этой силы, электроны непрерывно ускорялись бы и скорость, а следовательно, и ток должны были бы постоянно возрастать. Можно сказать, что сопротивление среды и есть мера «несвободы» электронов в металле. Электрон не наращивает скорость из-за того, что встречает на своем пути различные препятствия, о которые он как бы спотыкается: наращивает скорость, а затем теряет ее, наращивает и опять теряет и т. д. (рис. 20). В этом скачкообразном процессе он перемещается с некоторой средней «дрейфовой» скоростью  $v_d$ . Именно она и определяет ток. Но это лишь «вообще говоря», а если говорить конкретно: обо что «спотыкается» электрон? Практически о любую неоднородность структуры металла.

В квантовой теории протекание электрического тока через металл описывается как распространение электронных волн по атомным коридорам, играющим роль своеобразных волноводов. Если атомы расположены на плоскости в идеальном порядке, на равных расстояниях друг от друга, то

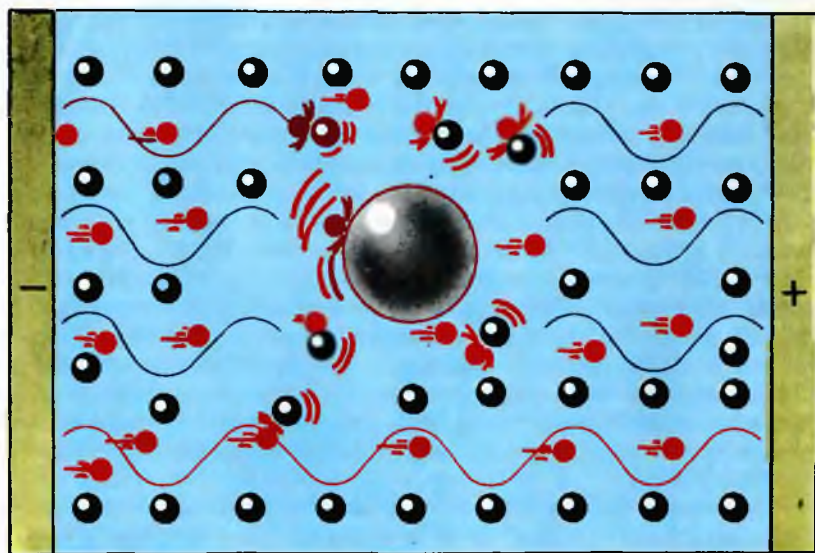


Рис. 21

такая плоскость полностью отражает электронные волны — наподобие идеального зеркала. Рассеяние и поглощение волн происходит только при нарушении строгого порядка в расположении атомов. Всякое нарушение строгой периодичности кристалла, его атомного порядка, воспринимается электроном как препятствие, как некая шероховатость стенок волновода. Таким препятствием могут быть, например, примесные чужеродные атомы. Один атом примеси может сбить с места сотни атомов кристалла — «хозяина» (рис. 21). Так как число примесных атомов от температуры не зависит, их вклад в сопротивление металла с температурой не изменяется.

Правильность атомных волноводов нарушается и тепловыми колебаниями. Мы, уже знающие, что совокупность тепловых возбуждений в решетке можно представить как газ квазичастиц — фононов, об этой причине сопротивления, оказываемого решеткой электронам, можем сказать так: рассеяние электронов на фононах. Так как плотность газа фононов с температурой растет, растет и обусловленный им вклад в сопротивление решетки движущимся электронам. Это и есть тепловая часть электрического сопротивления, зависящая от температуры. Охлаждая металл, ее можно сделать сколь угодно малой. И тогда роль примесей, а также дефектов, которые есть во всяком реальном кристалле, обнаружится в чистом виде: чем меньше примесей (дефектов), тем меньше окажется «остаточное» сопротивление. Этой возможностью определить степень чистоты металла физики пользуются очень широко.

## «ВАКУУМ» В КРИСТАЛЛЕ

Если охладить металлический кристалл до температуры, очень близкой к абсолютному нулю, то фононы практически исчезнут. Физики говорят: «вымерзнут». А при абсолютном нуле их в кристалле совсем не будет. Такое состояние кристалла физики называют *основным*.

Итак, основное состояние кристалла (состояние с наименьшей энергией) — состояние без квазичастиц. Его называют вакуумом квазичастиц. Конечно, это весьма условный вакуум. В нем есть и ионы, и электроны. Это вакуум относительно энергии, а не относительно частиц. Основное состояние — это состояние, в котором отсутствует тепловое движение. Квазичастицы рождаются при нагревании кристалла, при облучении его светом, при прохождении через кристалл какой-либо частицы, т. е. во всех случаях, когда энергия кристалла увеличивается. *Полная энергия кристалла складывается из энергии основного состояния и энергии квазичастиц.*

Рассчитать характер движения, энергию каждой из частиц, населяющих кристалл, — задача, разумеется, невыполнимая. Но, к счастью, и ненужная, ибо нас интересует только характеристики и свойства всего металла в целом. Предсказать же «среднее поведение» коллектива значительно легче, чем действия каждого из его членов. На этом основана любая статистика, в

частности и физическая. В статистической физике с самого начала отказываются от попытки описания отдельной частицы и рассматривают сразу «среднее поведение» большой их совокупности. При этом предсказываемые результаты имеют практически достоверный смысл.

## О ДВУХ СТАТИСТИКАХ

Статистические свойства коллектива квазичастиц существенно связаны с условиями их появления и исчезновения.

Некоторые квазичастицы могут рождаться и исчезать только поодиночке. В этом случае их называют *бозонами*. Статистические свойства таких частиц впервые были рассмотрены физиками Бозе и Эйнштейном.

В мире элементарных частиц примером бозона служит фотон — квант света, который может возникнуть при высвечивании атома и поглотиться при его возбуждении.

Другой тип квазичастиц описывается статистикой, связанной также с именами двух ученых Ферми и Дирака. Они называются фермионами. Фермионы рождаются парами: частица и античастица.

---

Любая частица является либо фермионом, либо бозоном. Физики находят этому фундаментальному факту определенные объяснения, в которые мы, однако, вникать здесь не станем. Заметим лишь, что существует связь между таким свойством микрочастицы, как *спин*, и характером ее поведения в коллективе. Наглядно спин соответствует как бы собственным вращениям частицы, это ее внутренний (собственный) момент количества движения.

Так вот, все частицы с полуцелым спином — фермионы, тогда как частицы без спина или с целочисленным спином — бозоны. Если некоторое энергетическое состояние занято фермионом, то никакой другой фермион данного типа не может попасть в это состояние. Иное дело — бозоны, они ведут себя совершенно иначе.

В любом состоянии может находиться сколь угодно однотипных бозонов. Более того, чем сильнее заселено данное состояние, тем больше вероятность, что в него будут переходить другие частицы такого типа.

Наиболее изученные фермионы — электроны и их античастицы — позитроны. Электрон не может исчезнуть, если поблизости нет позитрона. Столкновение электрона с позитроном приводит к исчезновению обоих. Освобождающаяся энергия излучается в виде света. И наоборот, квант света в определенных условиях может породить пару — электрон и позитрон.

Электрон проводимости тоже фермион. Правда, по своим свойствам он существенно отличается от своего «предка» — электрона в свободном пространстве. Но заряд его совпадает с зарядом электрона в вакууме. Это обстоятельство как бы напоминает нам: что бы ни говорили, а электрон есть электрон, где бы его ни обнаруживали — в атоме, в металле или плазме межзвездного пространства.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Электроны и в отдельном атоме, и в кристалле могут обладать лишь определенными — *разрешенными* значениями энергии, или, иными словами, находиться на определенных *энергетических уровнях*.

В атоме эти уровни расположены довольно далеко друг от друга. В этом случае принято говорить: *уровни образуют дискретный энергетический спектр* (рис. 22). При определенных условиях электроны могут переходить с одного уровня на другой — разрешенный уровень. Чем выше уровень, тем большей энергии он соответствует.

Когда атомы объединяются в кристалл, часть электронов по-прежнему остается на своих атомных орбитах, но наиболее удаленные от ядра получают возможность двигаться по всему кристаллу, благодаря тому что внешние орбиты соседних атомов перекрываются. А это значит, что и энергетические уровни, ранее принадлежавшие отдельным атомам, становятся общими для всего кристалла. В результате эти уровни расширяются в более или менее просторные интервалы допустимых значений — *энергетические зоны*. Зоны либо разделены запрещенными значениями энергий, так называемыми *запрещенными зонами*, либо перекрываются (рис. 23).

Еще важно знать, как располагаются электроны по энергетическим уровням. В основном состоянии электроны, естественно, обладают наименьшей энергией. Однако при этом они не могут собраться на дне самой нижней зоны. Этому препятствуют жесткие квантово-механические правила, которым они подчиняются: в каждом состоянии может находиться не более двух электронов. Это требование — *принцип Паули*, суть которого в том, что нельзя электронам, тождественным по своим свойствам, быть еще и тождественным по состоянию. «Хоть чем-нибудь, но отличайтесь друг от друга!» — вот приказ природы. Если бы электроны перестали ему подчиняться, то все кончилось бы плачевно, губительно! Во всех атомах все электроны оказались бы, очевидно, на уровне с наименьшей энергией, и нынешний

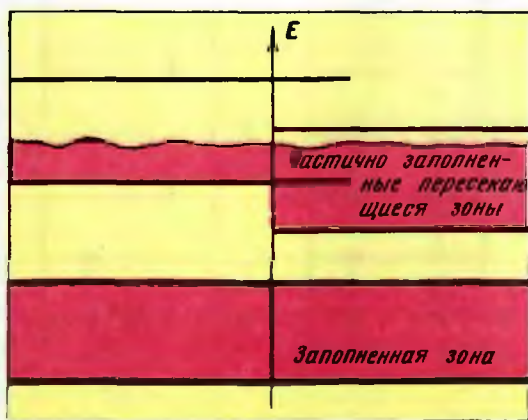
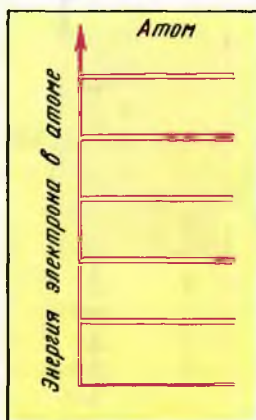


Рис. 22

Рис. 23

атом — основа мироздания — перестал бы существовать. Вместе с ним разрушился бы и весь наш мир!

Вернемся, однако, к электронам в металле. При температуре абсолютного нуля, когда электроны не возбуждены тепловым движением, на энергетической квантовой лесенке они занимают самые низкие ступеньки — по два на каждой. Уровень самой высокой ступеньки — он называется уровнем Ферми, и ему соответствует энергия Ферми — зависит от числа электронов в единице объема. Если электронный газ содержит  $n$  электронов, то последним занятым уровнем будет уровень с номером  $n/2$ . Ниже этой границы «битком набито», выше пусто, ничего (рис. 24, а).

С повышением температуры уровень Ферми как бы размывается: электроны, обмениваясь энергией, время от времени «выскакивают» на более высокие уровни, как это показано на рисунке 24, б. Однако такому возбуждению смогут подвергаться не все электроны. Те из них, которые расположены на глубинных ступеньках, остаются практически незатронутыми. Они не могут воспринимать тепловую энергию, так как для этого надо перейти на более высокие ступеньки, а они заняты. Поэтому «нагреваться» смогут лишь те электроны, которые расположены вблизи самой высокой ступеньки, около уровня Ферми (физики их так и называют — фермиевские электроны). Они, восприняв тепловую энергию, смогут перейти на более высокие свободные ступеньки.

Попробуем оценить число возбужденных электронов  $\Delta n$  (рис. 25). В интервале от 0 до  $E_F$  располагается  $n/2$  уровней, где  $n$  — число свободных электронов. Упрощая задачу, будем считать, что энергетические уровни отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии  $\Delta E = 2E_F/n$ . Тепловую энергию воспринимают электроны лишь узкой

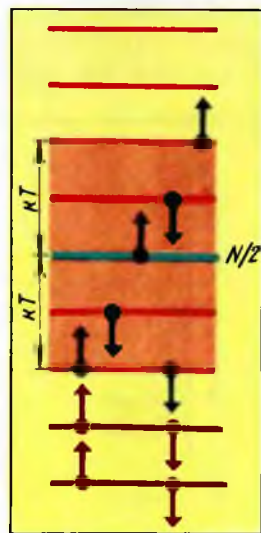
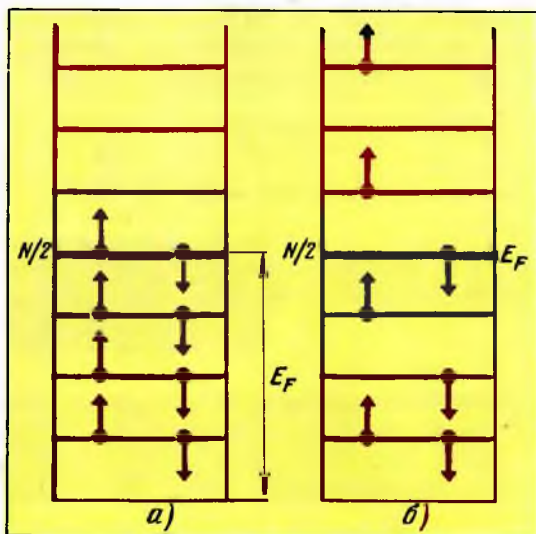


Рис. 24

Рис. 25

полосы ( $\approx kT$ ), непосредственно примыкающей к уровню Ферми. В этой полосе размещается  $kT / \Delta E = nkT / 2E_F$  уровней, на которых располагается  $nkT / E_F$  электронов. Полагая, что за уровень Ферми переходит половина из них, получаем  $\Delta n \approx nkT / 2E_F$ . При комнатной температуре  $T = 300$  К  $kT \approx 0,025$  эВ, а  $E_F$  около 5 эВ (постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, а одному электрону-вольту соответствует  $1,6 \times 10^{-19}$  Дж), поэтому  $\Delta n < 0,01n$ , т. е. меньше одного процента; при  $T = 1000$  К  $\Delta n = 0,03 \dots 0,5$ .

Таким образом, во всем интервале температур, в котором металлы могут существовать в твердом состоянии, распределение электронов мало отличается от распределения при абсолютном нуле. Происходит лишь незначительное размывание уровня Ферми.

Итак, выясняется парадоксальная ситуация: нагревается кристалл со всеми принадлежащими ему электронами, а тепловую энергию воспринимают лишь немногие из них и именно они и определяют тепловые свойства электронного газа. В этом и состоит разгадка того, что при обычных и низких температурах электроны, переносящие электрический ток в металле, вместе с тем не вносят почти никакого вклада в его теплоемкость. Эту трудность не смогла преодолеть классическая теория электропроводности твердого тела.

Конечно, с повышением температуры и по мере освобождения ступенек вблизи уровня Ферми на них могут переходить электроны с нижних уровней, и в конце концов все электроны начнут принимать участие в тепловом движении. Все станет на свои «классические» места. Но произойдет это лишь при температурах, когда энергия  $kT$  будет иметь такой же порядок величины, как и энергия Ферми  $E_F$ . Это температуры в десятки тысяч градусов. При такой температуре любой металл испарится, а с ним исчезнет и электронный газ. Таким образом, вплоть до температур плавления электронный газ в металле оказывается, как говорят физики, «сильно вырожденным», заведомо квантовым, со всеми его особенностями и свойствами. Именно это обстоятельство и позволяет объяснить самые разнообразные свойства металлов.

## ПРОВОДНИКИ, ДИЭЛЕКТРИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

Различная степень заполнения энергетических зон, а также различия в их относительном расположении позволяют разделить все твердые тела на две большие группы.

К первой группе относятся тела, у которых над заполненными целиком зонами располагается зона, заполненная электронами лишь частично (рис. 26, а), ко второй — тела, у которых над заполненными целиком зонами располагается пустая зона (рис. 26, б).

Можно сформулировать общее правило: если в основном состоянии есть только заполненные и пустые зоны, то такой кристалл — *диэлектрик (изолятор)*, а если одна или несколько зон частично заполнены электронами, то такой кристалл — *металл (проводник)*. В самом деле, допустим, что к кристаллу приложено электрическое поле. Ускоряясь под действием этого

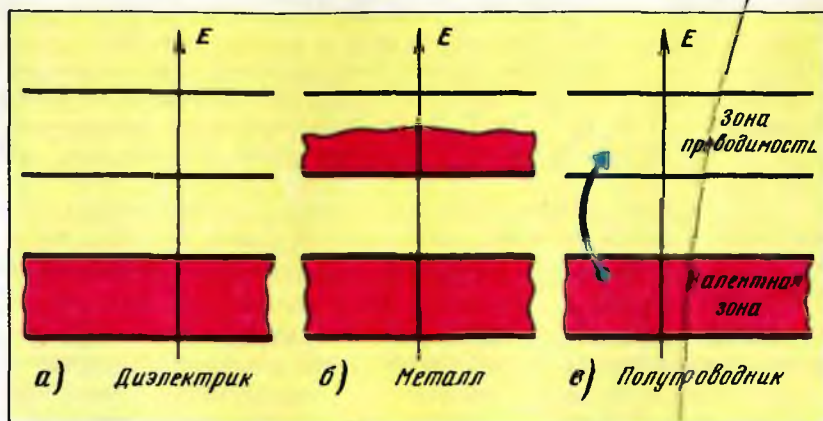


Рис. 26

поля, электрон увеличивает свою энергию и переходит на более высокую ступеньку, т. е. на более высокий энергетический уровень. Однако процесс может происходить только в том случае, если такой уровень имеется и если он свободен. У кристаллов с частично заполненными зонами это осуществляется. В этом случае уже слабое электрическое поле способно сообщить электронам дополнительный импульс (и энергию), чтобы перевести их на близлежащие свободные уровни. В теле появится преимущественное движение электронов, обуславливающее возникновение электрического тока. Такие тела должны быть хорошими проводниками, что и имеет место в действительности.

А вот для электронов в заполненных зонах такой процесс невозможен. Принцип Паули запрещает электронам занимать уже занятые уровни, а попасть в следующую разрешенную зону, которая совершенно пуста (ее называют *зоной проводимости*), они не могут, если энергия, полученная от электрического поля, много меньше ширины  $\Delta E$  запрещенной зоны.

Другое дело, когда пустая зона отделена от заполненной (ее называют *валентной зоной*) узкой энергетической щелью. Тогда достаточно сравнительно небольшой энергии теплового возбуждения для того, чтобы электрон перескочил из зоны, заполненной целиком, в свободную верхнюю зону (рис. 26, в). При любой, не слишком низкой температуре такие тела проводят ток, правда, гораздо хуже, чем металлы, и поэтому называются *полупроводниками*.

При температуре, равной абсолютному нулю, валентная зона в полупроводнике, как и в диэлектрике, целиком заполнена, и ток по образцу протекать не может. Но благодаря тому что энергия  $\Delta E$  невелика, уже при незначительном повышении температуры часть электронов может перейти в зону проводимости, причем их число растет с повышением температуры. Естественно, что при этом проводящие свойства улучшаются, т. е. сопротивление падает.



Вот еще на что следует здесь обратить внимание. Уходя из валентной зоны, электроны оставляют в ней свободные места. Следовательно, теперь уже оставшиеся электроны заполненной зоны могут, ускоряясь, переходить на эти места. Действительно, принцип Паули разрешает электрону занять освободившийся уровень в валентной зоне. Но, заняв этот уровень, он оставляет свободным свой собственный уровень.

Ясно, что, если электрон переходит на свободное место, скажем, слева направо, само свободное место — дырка перемещается справа налево. Электрон, как мы знаем, движется к катоду, т. е. ведет себя как положительный заряд.

Таким образом, при переходе каждого возбужденного электрона из валентной зоны в зону проводимости образуются две частицы — носители тока: *электрон проводимости* и *дырка*; последнюю можно трактовать как своеобразную квазичастицу — античастицу для электрона проводимости. Обращая внимание на это обстоятельство, хотелось бы еще раз подчеркнуть роль метода квазичастиц в современной теории твердого тела.

Необычайное разнообразие свойств твердых тел и есть свидетельство разнообразия квазичастиц. А электрические, тепловые, магнитные и другие явления — следствия этих свойств — объясняются на основании современных представлений о поведении квазичастиц различной природы.

Сотни лабораторий во всем мире заняты кропотливым и тщательным изучением сложного и еще не открывшегося нам до конца мира квазичастиц. Каждый год приносит все новые и новые результаты, порой неожиданные, порой подтверждающие существующие предположения. Физики разгадали уже многие законы природы, которым подчиняются твердые тела, обнаруживая различные «признаки жизни». И это, конечно, достойно восхищения.

Но как хорошо сказал замечательный физик Фейнман: «...мы не будем говорить о том, как мы умны, что открыли этот закон природы, но о том, как мудра природа, которая соблюдает его».



Радость видеть и понимать есть  
самый прекрасный дар природы.

А. Эйнштейн

Теперь, когда мы познакомились с основными представлениями современной физики твердого тела, вернемся к нашей непосредственной проблеме — к факту переноса зарядов в проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии.

Мы уже говорили, что некоторые электроны становятся сверхпроводящими и в отличие от «нормальных» электронов обладают свойством двигаться по металлу без каких-либо помех. Но как? За счет каких внутренних сокровенных изменений возникает это таинственное свойство сверхпроводящих электронов? Попробуем разобраться в этом процессе, подходя к нему с позиций квантового описания происходящих событий.

Физики давно уже подметили, что сверхпроводимость независимо от всех ее удивительных свойств в конечном счете является переходом из неупорядоченного состояния в упорядоченное. Рассматривая это явление на фоне остальных процессов, приводящих к упорядочению, они пришли к выводу, что новое состояние металлов обусловлено каким-то особым видом взаимодействий. Для понимания природы сверхпроводимости необходимо было найти этот вид взаимодействий. Только затем можно было создать микроскопическую теорию сверхпроводимости, объясняющую это явление.

## ИЗОТОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

На пути к микротeorии возникло множество трудностей. Правда, по счастливой случайности почти одновременно с теоретическими работами, в которых предсказывалась роль этого нового взаимодействия в создании сверхпроводимости, было получено поразительно однозначное подтверждение правильности этих предположений.

Правильный путь указал очередной достаточно скромный экспериментальный факт, открытый в 1950 г., так называемый *изотопический эффект*. Изучая сверхпроводимость у различных изотопов ртути и олова, физики обратили внимание на то обстоятельство, что критическая температура  $T_k$  перехода в сверхпроводящее состояние и масса изотопа  $M$  связана соотношением  $T_k M^{1/2} = \text{const}$ .

О чем говорит этот результат? Изотопы — это атомы одного и того же элемента, в ядрах которых содержится одинаковое число протонов, но разное

число нейтронов. Они имеют одинаковый заряд, но разную массу. Масса изотопа является характеристикой решетки кристалла и может влиять на ее свойства. От массы зависит, например, частота колебаний атомов в решетке. Она, так же как и критическая температура, обратно пропорциональна массе:  $\nu \sim M^{-1/2}$ . Значит, если массу  $M$  устремить к бесконечности, то температура перехода  $T_k$  будет стремиться к нулю, т. е. чем тяжелее атомы, тем медленнее они колеблются и тем труднее (при меньших температурах) получается идеальная проводимость, а чем выше энергия нулевых колебаний, тем легче.

Таким образом, изотопический эффект указывал на то, что колебания решетки участвуют в создании сверхпроводимости!

Сверхпроводимость, которая является свойством электронной системы металла, оказывается связанной с состоянием кристаллической решетки. Следовательно, возникновение эффекта сверхпроводимости обусловлено взаимодействием электронов с решеткой кристалла.

## ТЕОРИЯ БКШ

Многие ученые в разных странах, используя разные подходы, внесли вклад в создание теории сверхпроводимости. Первым из них был замечательный советский физик Л. Д. Ландау. Он первым сопоставил два «странных» явления — сверхпроводимость и сверхтекучесть и предположил, что эти явления родственны. Сверхпроводимость — это сверхтекучесть электронной жидкости. Идея Ландау оказалась в высшей степени плодотворной, на ее основе было построено большинство теорий сверхпроводимости.

В 1950 г. В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау предложили феноменологическую теорию сверхпроводимости, позволившую рассчитать ряд существенных свойств сверхпроводников, описать их поведение во внешнем поле. Теория эта была обоснована Л. П. Горьковым, разработавшим метод исследования сверхпроводящего состояния, применяемый сейчас в теоретических разработках.

Следующий шаг был сделан почти одновременно советским физиком академиком Н. Н. Боголюбовым и американскими физиками Бардиным, Купером и Шриффером. Американские ученые успели несколько раньше поставить последнюю точку.

Сверхпроводимость, как оказалось, проявляется в тех случаях, когда электроны в металле *группируются в пары*, взаимодействующие через кристаллическую решетку. Они тесно связаны между собой, так что разорвать пару и разобщить электроны чрезвычайно трудно. Такие мощные связи позволяют электронам двигаться без всякого сопротивления сквозь решетку кристалла, помогая друг другу.

Исходя из этих представлений, Бардин, Купер и Шриффер в 1957 г. построили долгожданную микроскопическую теорию сверхпроводимости, за которую они в 1972 г. были удостоены Нобелевской премии. Эта теория,

известная сегодня под названием «теория БКШ», не только позволила с уверенностью сказать, что механизм сверхпроводимости действительно ясен, но и впервые привела к установлению связи между критической температурой  $T_k$  и параметрами металла.

## КОГДА ЭЛЕКТРОНЫ ПРИТЯГИВАЮТСЯ ДРУГ К ДРУГУ

Возможность такого притяжения для многих читателей неожиданна. В самом деле, из школьной физики все мы знаем, что согласно закону Кулона одноименные заряды отталкиваются друг от друга. Поэтому два электрона должны отталкиваться.

Положение может измениться, однако, если вблизи от рассматриваемых электронов находятся другие электроны и ионы. В твердом теле, как мы уже знаем, электроны нельзя считать свободными: они там движутся в поле фононов — рождают их, рассеивают, поглощают, обмениваются ими. Это может привести к изменению наблюдаемых взаимодействий между самими электронами.

Наличие среды в принципе может менять даже знак взаимодействия между частицами: превращать его из притягивающего в отталкивающий или наоборот. Это несколько не противоречит законам физики. Судите сами, в среде сила взаимодействия между двумя зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , как известно, равна  $F = q_1 q_2 / \epsilon r^2$ , где  $r$  — расстояние между зарядами, а  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды. Если среда такова, что  $\epsilon < 0$ , то одноименные заряды (в нашем случае электроны) будут притягиваться. Наглядно проявление сил притяжения можно продемонстрировать с помощью простой механической модели.

Представьте себе тонкую резиновую пленку, натянутую на каркас. Положим на пленку два тяжелых шарика. Каждый шарик, если он достаточно удален от другого, деформирует пленку, как показано на рисунке 27. Если теперь плавно наклонять каркас, шарики начнут двигаться и, когда они подойдут достаточно близко друг к другу, один из них скатится в углубление, образованное другим. Для стороннего наблюдателя все будет представляться так, как если бы между шариками действовали силы притяжения.



Рис. 27

Таким образом, с помощью упругой резиновой пленки мы создали взаимодействие между шариками, которое привело к связанному состоянию, т. е. к состоянию, когда шарики максимально сближены друг с другом в пространстве.

Конечно, это сравнение, как и всякая аналогия, должно в основном служить одной цели: создать наглядный образ. Однако этот образ сам по себе может служить ключом к пониманию сути явления.

Чем же может быть обеспечено притяжение между двумя электронами в металле? Модель наглядно показывает, что притягивающее взаимодействие может реализоваться благодаря упругим искажениям. До известной степени упругими свойствами обладает и решетка кристалла. Ведь положительно заряженные ионы металла, возникшие после того, как атомы лишились своих внешних электронов, привязаны к своим равновесным положениям не жестко и как мы знаем, могут отклоняться от них. Когда один из электронов, движущихся в металле, — назовем его первым — проходит около положительно заряженных ионов, то он притягивает к себе, вызывая тем самым «сморщивание» решетки (рис. 28). Принято говорить, что под действием отрицательного заряда решетка поляризуется. По сравнению с равномерным распределением положительных зарядов в решетке поляризация означает скопление положительного заряда вблизи поляризующего электрона.

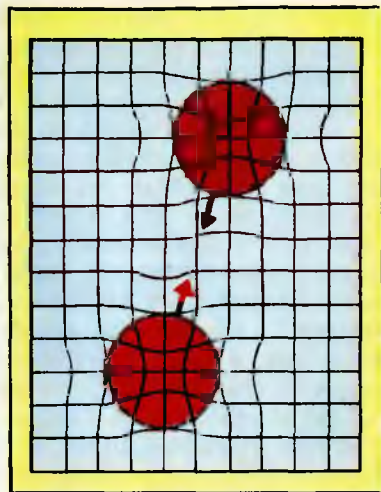


Рис. 28

Второй электрон, естественно, притягивается к месту поляризации, т. е. к области с избытком положительного заряда, а следовательно, и к первому электрону. Электрон как бы окутывается облаком положительного заряда, и к этому облаку притягивается второй электрон, несущий в свою очередь «на себе» область поляризации решетки. Кристаллическая решетка при этом играет роль промежуточной среды, наличие которой приводит к притяжению между двумя электронами (среды, которая делает отрицательной диэлектрическую проницаемость в сверхпроводнике).

Появление дополнительного межэлектронного притяжения может быть описано и на языке квантовой физики. Электрон, движущийся в кристалле, взаимодействует с решеткой и переводит ее в возбужденное состояние. Обратный переход ее сопровождается излучением энергии, которая поглощается другим электроном. Пользуясь квантовой терминологией, этот процесс можно описать как излучение фонона электроном, движущимся в решетке, и последующее поглощение фонона другим электроном. Обмен фононами и создает в квантовой картине притяжение между электронами.

## ЭЛЕКТРОНЫ ОБЪЕДИНЯЮТСЯ В ПАРЫ

Итак, электрон при своем движении может возбудить колебания кристаллической решетки проводника, а те в свою очередь могут ответно воздействовать и на него, и на любой другой электрон. Такое взаимодействие, как утверждает теория, может привести к попарному согласованию

движения электронов. Вопреки кулоновскому отталкиванию электроны могут оказаться связанными друг с другом. Такие пары физики называют *куперовскими* по имени Леона Купера, впервые показавшего, что сверхпроводимость в металлах связана с образованием электронных пар.

Таким образом, эффект сверхпроводимости возникает благодаря притяжению, существующему между некоторыми электронами. Мы говорим «некоторые электроны» не случайно. Дело в том, что притяжение относится только к части электронов в металле, и, вообще говоря, к очень небольшой их части. Конкретно речь идет об электронах, которые могут возбуждаться и изменять свои состояния. Таковыми, как мы уже знаем, являются лишь фермиевские электроны, т. е. электроны с энергией, близкой к энергии Ферми  $E_F$  (см. рис. 24, а). Именно они ответственны за электропроводность металлов, и лишь притяжение между этими электронами необходимо для возникновения сверхпроводимости.

Но это еще не все. Оказывается, не всякие два электрона одинаково притягиваются друг к другу. Фактически одним из основных элементов модели Купера было как раз утверждение, что пару могут создавать два электрона, импульсы которых равны по величине и противоположны по направлению, т. е. полный импульс пары равен нулю.

Не следует, однако, думать, что спаренные электроны «слипаются» друг с другом, образуя единое целое. Размер пары довольно большой — он составляет величину порядка  $10^{-6}$  м. В кристалле в таком объеме размещается громадное число электронов, объединенных в пары, так что понятие изолированной пары электронов теряет смысл. Эти пары перекрывают друг друга, образуя *единый коллектив*. При очень низких температурах это в высшей степени координированное состояние электронов осуществляется самопроизвольно, потому что выигрыш в энергии для каждой пары превышает потери, связанные с тем, что свобода отдельных электронов утрачивается. Вот почему сверхпроводящее состояние устойчиво и для его разрушения нужно приложить к сверхпроводнику немалую энергию (тепловую, магнитную, электрическую).

## ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАР В МЕТАЛЛЕ

Пространственное перекрытие огромного числа пар неизбежно приводит к строгой взаимной согласованности, *корреляции* их движения. Пары не могут двигаться независимо друг от друга, как электроны в нормальном металле. Каждая пара, взаимодействуя со всеми остальными, должна двигаться как бы в унисон, и любое нарушение в движении данной пары должно сказываться на свойствах всей совокупности пар.

Иначе говоря, все пары должны соответствовать друг другу по всем физическим параметрам. На квантовом языке это означает, что спаренные электроны должны принадлежать к одному и тому же состоянию и иметь одинаковую энергию. «А как же принцип Паули?» — спросите вы. Ведь согласно законам микромира определенное состояние может быть занято

только одной частицей. Здесь же мы говорим о том, что одно состояние занято множеством частиц, состоящих из электронов. Как же это возможно? Ответ прост: мы имеем дело уже не с электронами, а с новыми частицами — *куперовскими парами*. Электронная пара, которую можно теперь рассматривать как целое (бизэлектрон), является *бозоном*. А для бозонов, как мы знаем, принципа запрета Паули не существует. Такие частицы могут в сколь угодно большом количестве занимать одно и то же состояние. Иными словами, куперовские пары проявляют тенденцию накапливаться в отдельных состояниях. Заметим, что эти состояния не имеют ничего общего с уровнями энергии отдельных электронов: они могут быть заняты только куперовскими парами.

Возникает оптимальное единое распределение куперовских пар, или, как говорят физики, конденсат, вырвать из которого отдельную пару тем труднее, чем больше их находится в этом конденсате.

В отсутствие внешнего поля все пары вследствие полной корреляции имеют импульс, равный нулю, так как они образованы электронами с равными и противоположно направленными импульсами. Однако ситуация мгновенно изменится, если мы поместим нашу совокупность куперовских пар в электрическое поле, скажем, путем приложения к сверхпроводнику внешней разности потенциалов. Пары будут ускоряться в электрическом поле, т. е. получать импульс. Но и этот импульс для всех пар должен быть абсолютно одинаковым.

Возникновение тока не нарушает корреляции пар: под действием внешнего источника, вызвавшего ток, все они приобретают один и тот же импульс и движутся как единый коллектив в одном и том же направлении с некоторой дрейфовой скоростью. При этом поведение таких пар в металле существенно отличается от поведения обычных электронов, совершающих направленное движение.

В обычном, неспаренном состоянии электроны рассеиваются на примесях, вкрапленных в металл, или на тепловых колебаниях решетки — фононах. Это приводит к хаотизации их движения и является причиной возникновения электрического сопротивления. Куперовские же пары, пока они не разорваны, рассеиваться на дефектах решетки не могут, так как вывод любой из них из строго коррелированного коллектива маловероятен. «Отскакивание» одного из членов пары в сторону при встрече с дефектом решетки компенсируется поведением его «партнера». Компенсируется в том смысле, что суммарный импульс пары электронов остается неизменным.

Пару можно вырвать из конденсата, лишь разрушив ее. Для этого, однако, необходима определенная энергия. Но при низких температурах число фононов, обладающих достаточной для этого энергией, исключительно мало. Поэтому подавляющее большинство куперовских пар сохраняется неразрушенным.

Не испытывая рассеяния, куперовские пары могут двигаться сквозь решетку кристалла без всякого сопротивления. А это и есть сверхпроводимость.

## КОНЕЧНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Совершенный конденсат, охватывающий все электроны, способные объединяться в пары, может существовать только при абсолютном нуле. С повышением температуры тепловое возбуждение в конце концов становится достаточным, чтобы разрушить пары. Образуются при этом «нормальные», несвязанные электроны становятся той разрушительной силой, которая уничтожает электронные пары. Они «портят» механизм притяжения между электронами и тем самым ослабляют силы связи между образовавшимися парами. Это ведет в свою очередь к дальнейшему разрушению пар. А когда температура поднимается еще выше, разрушение приобретает катастрофический характер: выше некоторой определенной температуры уже ни одна пара существовать не может. При этом величина критической температуры  $T_k$  оказывается одного порядка с энергией спаривания (энергию измеряем в градусах). Основным количественный результат теории — это формула для критической температуры:

$$T_k = 1,14 h \nu e^{-1/g}$$

Здесь  $e=2,7$ ;  $h\nu$  — средняя энергия фононов, по порядку величины равная дебаевской температуре  $\Theta$ ;  $g$  — постоянная, определяющая силу притяжения между электронами. Очевидно, значение критической температуры тем выше, чем выше температура Дебая  $\Theta$  и параметр  $g$ .

Фононы в твердом теле могут иметь ограниченную энергию. Энергия фонона пропорциональна его частоте  $\nu$ , которая в свою очередь не превышает значений  $\nu_{\max}$  порядка  $10^{13}$  Гц. Это значит, что энергия фононов не превосходит нескольких сотен градусов. Действительно,  $E_{\text{ср. max}} = h\nu_{\max} \approx 5 \cdot 10^{-23}$  Дж или в градусах ( $E = kT$ )  $E_{\text{ср. max}} = \frac{h\nu}{k} \approx 500$  К (постоянная Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, постоянная Больцмана  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К). Таким образом, дебаевская температура  $\Theta$  не превосходит сотен градусов, обычно она лежит в пределах температуры 100...500 К. Что касается параметра  $g$ , то для обычных сверхпроводников, у которых роль посредника при спаривании электронов выполняет кристаллическая решетка,  $g = 1/2$  и даже несколько меньше. Так мы приходим к выводу, что максимальная критическая температура не может превосходить 30...40 К. Вывод, прямо скажем, малообнадешивающий.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЩЕЛЬ

А теперь сопоставим все сказанное выше. Мы говорили, что для получения сверхпроводимости нужно добиться притяжения между электронами, которое привело бы к их спариванию. Пары образуются из электронов, занимавших уровни энергии, вплоть до уровня Ферми, причем объединяются в куперовскую пару электроны, бывшие на одном уровне. Как же отражается на них это объединение?



Связываясь, пара электронов как бы попадает в энергетическую яму. Для этого ей надо отдать некоторую энергию кристаллической решетки. Отданная энергия называется *энергией связи пары*  $E_c$ . Стало быть, для перевода электронов из сверхпроводящего состояния в нормальное необходимо затратить энергию на разрыв пары не меньше энергии связи, т. е. энергию  $\Delta = \frac{E_c}{2}$  на каждый электрон. Поэтому энергетический спектр электронов в сверхпроводнике можно представлять следующим образом: все электронные уровни-лесенки сдвигаются вниз по сравнению с уровнем Ферми на величину, равную  $\Delta$  (рис. 29). Если теперь в такой сверхпроводник попадет неспаренный электрон, он должен занять уровень на  $2\Delta$  выше последнего из занятых спаренными электронами. Туда же должны волею-неволей переходить электроны из разорванных пар. А вот энергетический промежуток от  $E_F - \Delta$  до  $E_F + \Delta$  будет оставаться незанятым; говорят, что в энергетическом электронном спектре сверхпроводника имеется *энергетическая щель* величиной  $2\Delta$ . Иными словами, нормальное состояние электронов в сверхпроводнике отделено от сверхпроводящего состояния энергетической щелью. Энергетическая щель в сверхпроводниках очень похожа на запрещенную зону, отделяющую, скажем, зону проводимости от валентной (заполненной) зоны полупроводника или металла. Но физическое происхождение у нее совершенно другое, и, главное, у нее другая ширина. Щель в сверхпроводнике гораздо уже. Ее значение можно приблизительно оценить, зная критическую температуру  $T_k$ :  $2\Delta \approx 3,5 kT_k$ . При критической температуре, равной примерно 20 К, величина энергии  $2\Delta \approx 2,8 \cdot 10^{-22}$  Дж  $\approx 1,7 \cdot 10^{-3}$  эВ. В большинстве случаев критическая температура  $T_k$  меньше 20 К и величина энергетической щели соответствует  $10^{-4}$  эВ.

Энергетическая щель в сверхпроводниках наблюдается на опыте. При этом не только обнаруживается существование щели в спектре, что само по себе является подтверждением правильности основного положения теории БКШ, но и измеряется ее ширина.

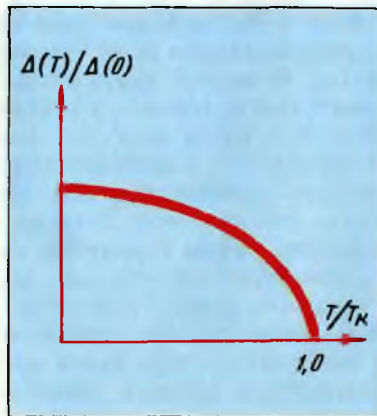
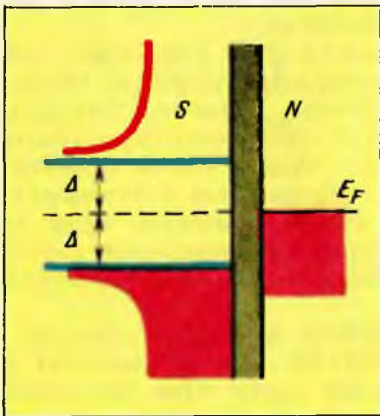


Рис. 29

Рис. 30

В настоящее время разработан ряд методов измерения энергии связи. Один из них, позволяющий сделать количественные выводы о величине энергетической щели, основан на изучении поглощения энергии в сверхпроводнике и не происходит до тех пор, пока энергия квантов падающего излучения не превысит ширину щели. После этого поглощение быстро возрастает до значения в нормальном металле. По энергиям квантов  $h\nu$ , вызывающих поглощение энергии, определяется ширина энергетической щели сверхпроводника:  $h\nu = 2\Delta$ .

Надо сказать, что энергетическая щель в сверхпроводнике вовсе не есть раз и навсегда заданная величина. Она зависит от температуры в магнитном поле. Увеличение, например, температуры приводит к уменьшению величины энергетической щели, и при критической температуре она обращается в нуль. Это и понятно. С увеличением температуры в сверхпроводнике появляется все больше фононов с энергией, равной величине энергетической щели, или больше ее, и они разрушают все большее число пар, превращая их в нормальные электроны. Но чем меньше остается пар, тем меньшим становится их вклад в притяжение, тем оно слабее, а значит, тем более узкой становится энергетическая щель.

Зависимость величины энергетической щели от температуры показана на рисунке 30. Сплошная кривая теоретическая; точками показаны значения, полученные опытным путем. Можно отметить исключительно хорошее согласие теории и эксперимента, которое подтверждает правильность основных положений современной теории сверхпроводимости.

## БЕСЩЕЛЕВАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Нам остается добавить к сказанному еще несколько слов о так называемой *бесщелевой сверхпроводимости*.

В первые годы после создания теории БКШ наличие энергетической щели в электронном спектре считалось характерным признаком сверхпроводящего состояния. Сегодня нам известна также сверхпроводимость без энергетической щели — *бесщелевая сверхпроводимость*.

Как было впервые показано А. А. Абрикосовым и Л. П. Горьковым, при введении магнитных примесей критическая температура эффективно уменьшается. Атомы магнитной примеси обладают спином, а значит, спиновым магнитным моментом, и, когда мимо них движутся куперовские пары, спины входящих в них электронов взаимодействуют со спинами атомов примеси. При этом спины пары оказываются как бы в параллельном и антипараллельном магнитном поле примеси. Энергия их меняется различно. Один из электронов куперовской пары стремится «подстроить» направление своего спина к спину атома примеси, что при достаточной силе взаимодействия ему и удается, но ценой разрушения пары.

С увеличением концентрации атомов магнитной примеси в сверхпроводнике все большее число пар будет разрушаться, и в соответствии с этим будет уменьшаться ширина энергетической щели. При некоторой

концентрации  $n$ , равной  $0,91n_{кр}$  ( $n_{кр}$  — значение концентрации, при которой полностью исчезает сверхпроводящее состояние), энергетическая щель становится равной нулю. Возникает парадоксальная ситуация — щели нет, а вещество остается сверхпроводящим (его электрическое сопротивление, например, продолжает оставаться равным нулю).

С чем же связано появление бесщелевой сверхпроводимости? Можно предположить, что при взаимодействии с атомами примеси часть пар оказываются временно разорванными. Такому временному распаду пары соответствует появление локальных энергетических уровней в пределах самой энергетической щели. С ростом концентрации примесей щель все более заполняется этими локальными уровнями до тех пор, пока не исчезает совсем. Возникает картина, похожая на известную нам «двухжидкостную» модель. Существование «свободных» электронов, образовавшихся при разрыве пары, приводит к исчезновению энергетической щели, а оставшиеся же куперовские пары обеспечивают равенство нулю электрического сопротивления.

Мы приходим, таким образом, к выводу, что существование щели само по себе вовсе не является обязательным условием проявления сверхпроводящего состояния. Тем более что бесщелевая сверхпроводимость, как оказалось, явление не столь уж и редкое. Это состояние возникает, например, в тонких пленках в присутствии внешнего магнитного поля, в пленках с током, близким к критическому, и т. д. Так что главное — это наличие связанного электронного состояния — куперовской пары. Именно это состояние может проявлять сверхпроводящие свойства и в отсутствие энергетической щели.

«Парные корреляции, — писал один из создателей теории БКШ Шриффер, — на которых основана теория спаривания электронов, наиболее существенны для объяснения основных явлений, наблюдаемых в сверхпроводящем состоянии».

## ТУННЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ



Сотри случайные черты —  
И ты увидишь! Мир прекрасен.

А. Блок

Эффективное межэлектронное притяжение в сверхпроводниках и связанное с ним появление щели в энергетическом электронном спектре позволили объяснить совокупность экспериментальных факторов, полученных при изучении сверхпроводников, и предсказать ряд новых явлений.

Среди экспериментов, выполненных под влиянием микроскопической теории, прежде всего следует отметить измерения, связанные с так называемым *туннельным эффектом*. Исследовался переход электронов через тонкий непроводящий слой, разделяющий два металлических проводника.

Схематически устройство для наблюдения этого эффекта показано на рисунке 31. Два металлических проводника, например, две пленки или пластинки, разделены слоем диэлектрика. В диэлектрике, как известно, свободных зарядов нет. Поэтому мы вправе ожидать, что через этот изолирующий слой ток протекать не может.

И вот здесь мы встречаемся с любопытным фактом. Зазор между двумя проводниками, заполненный диэлектриком либо вовсе пустой, эквивалентен тому, что в этом месте перед электронами вырастает достаточно высокий энергетический барьер. Чтобы преодолеть этот барьер, электрону нужна энергия, а в обычных условиях ее взять неоткуда. Стало быть, утверждает классическая физика, электроны переходить из одного проводника в другой при таких условиях не могут. Однако эксперимент показывает, что если слой диэлектрика достаточно тонкий, то через него все-таки может течь ток, хотя и очень незначительный по величине. Электроны, как оказалось, могут переходить сквозь барьер, даже если их энергия недостаточна для его преодоления. Они «просачиваются» сквозь барьер, словно по туннелю. Туннель — это аналогия. Но аналогия довольно глубокая.

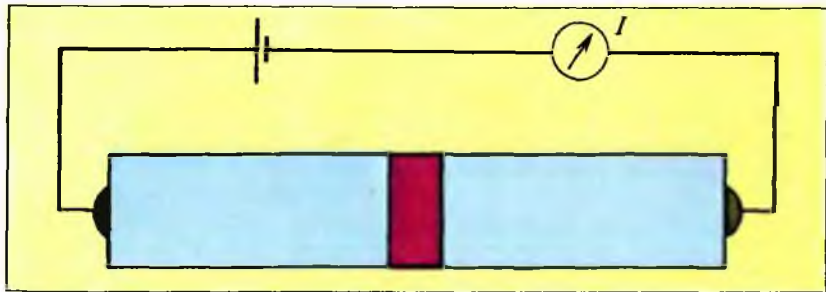


Рис. 31

## ЭЛЕКТРОН ПОДХОДИТ К БАРЬЕРУ

Туннельный эффект известен в физике давно. Это один из основных квантово-механических эффектов, и разобраться в нем можно, только подходя к нему с позиций квантового описания происходящих событий. Действительно, здесь в полном смысле слова царство «микрофизики» со всем тем, что нередко кажется парадоксальным с точки зрения наших привычных представлений, нашего опыта. Вот пример.

Представьте себе горизонтальный желоб, по которому без трения скользит массивный шарик. Что произойдет, если шарик встретит на своем пути горку — участок с наклоном? Эта ситуация показана на рисунке 32, где по оси абсцисс отложена координата шарика  $x$ , а по оси ординат — его потенциальная энергия.

Ответ ясен. Теряя скорость, шарик покатится в гору. Если его начальная кинетическая энергия была больше потенциальной максимальной энергии, то он благополучно перевалит через вершину горки и покатится дальше. А если наоборот, то перевалить через вершину горки шарик не сможет. На склоне найдется такая «точка поворота», где вся кинетическая энергия перейдет в потенциальную, и в соответствии с законом сохранения энергии шарик остановится, а затем покатится обратно. Шансов проникнуть за барьер (горку) у него нет абсолютно никаких. Это ему запрещено.

А вот квантовая частица — электрон, на пути которого возникает преграда, в аналогичной ситуации все же как-то «умудряется» просочиться через барьер. По законам квантовой механики никакого запрета для него не существует. Недаром физики говорят, что электрон способен проскочить через стену, в которой отверстий вовсе нет!

Попытаемся внести в этот абстрактный и до некоторой степени противоречивый нашему здравому смыслу вывод хотя бы некоторый элемент наглядности. Невозможность проникновения частицы (в нашем случае шарика) в область за барьером можно уподобить известному в оптике явлению полного внутреннего отражения. Согласно геометрической оптике лучи, падающие под углом больше предельного, не проникают из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную.

Однако более подробное рассмотрение этого явления, основанное на законах не геометрической, а волновой оптики, приводит к возможности проникновения света во вторую среду. При этом если оптически более плотная среда представляет собой тонкую пластинку, то световая волна будет проходить (просачиваться) сквозь нее, несмотря на то что угол его падения больше предельного.

А теперь вспомним о двойственной природе электрона. Помните, частица в квантовой механике — это не совсем обычный шарик, пусть даже сверхмалых размеров, она обладает и волновыми свойствами. А волна, как мы выяснили, все же слегка проникает в запретную область, она как бы проверяет возможность проникновения в эту среду. При этом ее амплитуда затухает и тем быстрее, чем больше разница между ее энергией и разре-

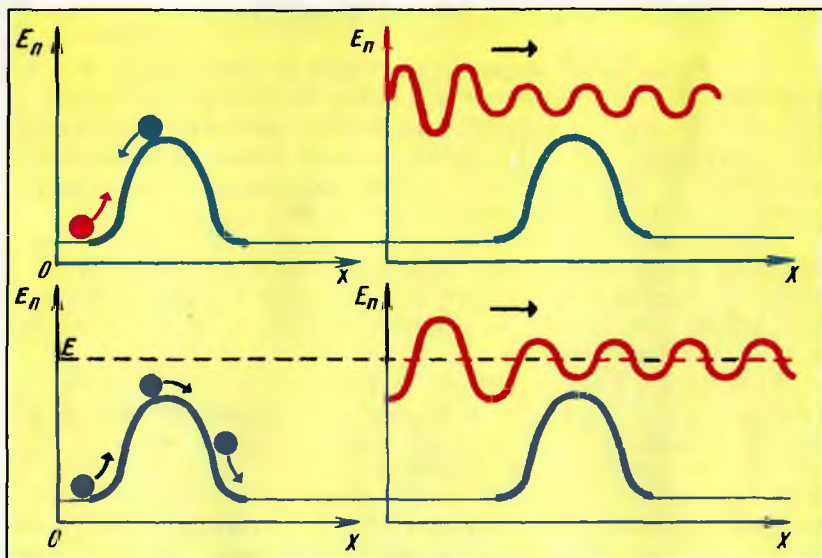


Рис. 32

шенной энергией в этой среде, или, говоря иначе, чем выше энергетический барьер (см. рис. 32).

Вот и выходит, что, какова бы ни была энергия электрона и как бы ни был высок энергетический барьер, всегда есть отличная от нуля вероятность найти электрон внутри барьера, а если барьер не очень широк, то и за барьером, по другую его сторону. Тогда на обратной стороне барьера появляется конечная амплитуда, а согласно законам квантовой механики квадрат амплитуды и определяет вероятность того, что электрон будет здесь найден, если провести соответствующий эксперимент.

При этом электроны «пробивают» только строго горизонтальные туннели, на выходе из которых полная энергия частицы точно такая же, как и на входе. Туннелирование возможно только в том случае, если уровни, на которые переходят электроны, не заняты, ибо в противном случае вступает в силу запрет Паули.

Итак, не имея достаточной энергии, чтобы перескочить через преграду, электрон как бы «прорывает» туннель в его недрах (точнее, он добавляет к той энергии, которую имеет, энергию, равную высоте барьера, перепрыгивает над ним и, отдав эту энергию, оседает на таком же по высоте энергетическом уровне. Попытка «уличить» частицу — заставить ее с лишней энергией в энергетически нелегальной области — не удастся). Вероятность такого перехода, или, как говорят физики, прозрачность барьера, зависит от энергии электрона и очень сильно от ширины и высоты барьера. Туннельный эффект становится наблюдаемым лишь при толщинах барьеров, меньших 100 Å, так что у применяемых электрических изоляционных покрытий громадный запас прочности в отношении туннельного тока.

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ МЕЖДУ ДВУМЯ НОРМАЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Рассмотрим теперь с изложенной точки зрения контакт между двумя проводниками из одинакового металла.

Схема такого контакта изображена на рисунке 33, *а*, где для простоты предполагается, что металлы разделены вакуумом. Здесь туннелирования быть не может: уровень Ферми находится у них на одинаковой высоте и все состояния вплоть до уровня Ферми с обеих сторон заполнены. Свободных уровней, куда могли бы переходить электроны, нет.

Однако если между металлами создать небольшую разность потенциалов  $U$  (скажем, с левой стороны отрицательную по отношению к правой части), то энергетические уровни сместятся относительно друг друга (рис. 33, *б*). Положения уровней Ферми слева и справа от изолирующего слоя будут различаться на величину  $eU$ . Энергия электронов как отрицательно заряженных частиц будет на стороне положительного потенциала ниже, чем на стороне отрицательного. Теперь справа против верхней части левой области с заполненными уровнями возникнут состояния незаполненные, и туннелирование может происходить слева направо, как показано стрелками на ри-

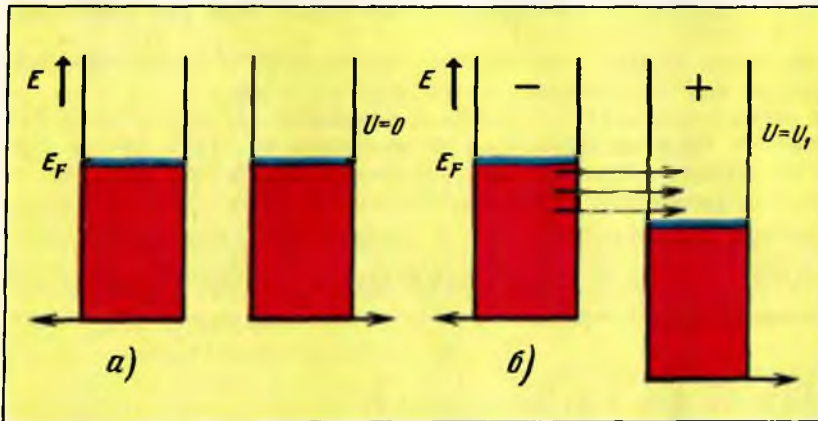


Рис. 33

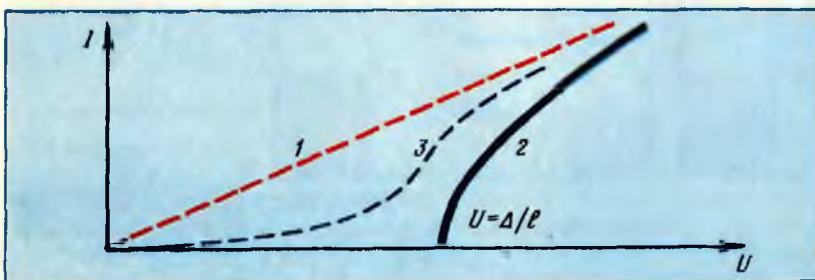


Рис. 34

сунке 33,б. Поскольку число уровней, возникших таким образом и доступных для электронов левой области, пропорционально разности потенциалов, то туннельный ток будет линейно расти с увеличением этой разности потенциалов. Чем выше напряжение, тем выше туннельный ток. Зависимость тока от напряжения показана на рисунке 34 штриховой линией 1.

### ТУННЕЛИРОВАНИЕ МЕЖДУ НОРМАЛЬНЫМ МЕТАЛЛОМ И СВЕРХПРОВОДНИКОМ

А теперь посмотрим, что произойдет при контакте нормального металла со сверхпроводником. Вольт-амперная характеристика такого туннельного контакта, конечно, должна измениться. Это легко понять, если вспомнить, что в сверхпроводящем состоянии в электронном спектре возникает энергетическая щель.

Схема туннельного контакта нормальный металл — сверхпроводник изображена на рисунке 35. (Так же как и на рис. 33, для упрощения выбрана ситуация при абсолютном нуле.) Соответствующая вольт-амперная характеристика приведена на рисунке 34 (сплошная кривая). Вплоть до напряжения  $U = \frac{\Delta}{e}$  туннельный ток протекать не может, так как электроны нормального металла не могут найти подходящих уровней в сверхпроводнике: их встречает негостеприимная энергетическая щель.

Приложим теперь к системе разность потенциалов. При этом картина уровней смещается, но туннелирования происходить не будет до тех пор, пока нижний из уровней, отвечающих отдельным электронам над энергетической щелью, не сравняется с уровнем Ферми для нормального металла. Произойдет это при напряжении  $U = \frac{\Delta}{e}$ . С увеличением напряжения электроны из нормального металла начнут переходить на свободные одиночные

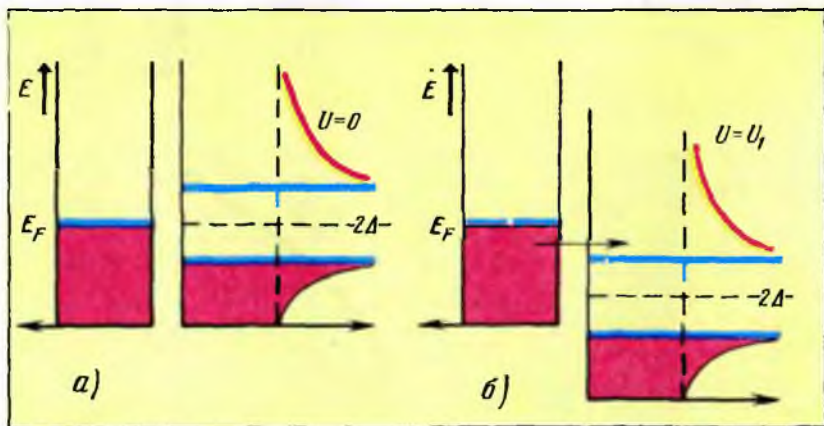


Рис. 35



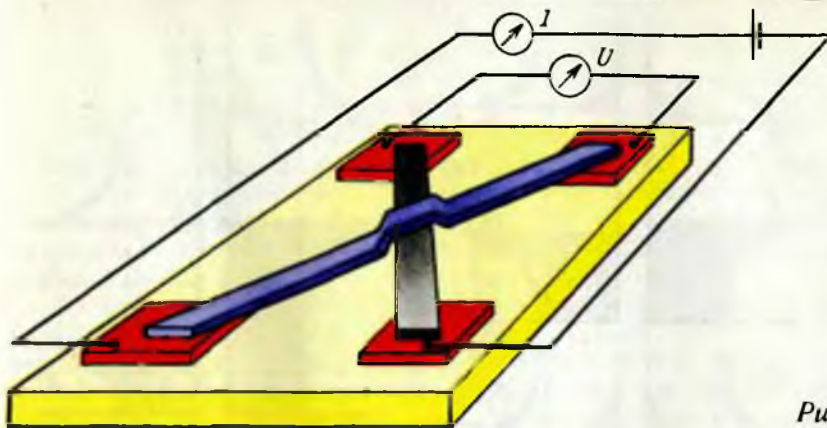


Рис. 36

уровни сверхпроводника и ток начнет быстро расти, приближаясь к туннельной характеристике двух нормальных металлов.

При температуре, отличной от абсолютного нуля, уровень Ферми в нормальном металле несколько размыт и соответственно в сверхпроводнике имеются отдельные электроны над щелью, которая становится несколько уже. В этом случае мы получим вольт-амперную характеристику, изображенную кривой 3 на рисунке 34. Добавим к этому, что характеристика не зависит от полярности приложенного напряжения; она оказывается, таким образом, совершенно симметричной, и, естественно, соответствующие туннельные токи идут в противоположных направлениях.

Впервые вольт-амперные характеристики такого типа наблюдал в 1960 г. норвежец Гиавер. Свои опыты он проводил на паре тонких пленок из алюминия и свинца, погруженных в кипящий гелий. В качестве диэлектрического зазора (барьера) использовалась окись алюминия. Алюминий с температурой перехода в сверхпроводящее состояние 1,2 К играл в этой паре роль нормального металла, а свинец с критической температурой 7,2 К — роль сверхпроводника (рис. 36).

Опыты Гиавера были просты и убедительны. В них впервые непосредственно и поэтому точно была измерена величина энергетической щели. Измерялась она с помощью вольтметра и соответствовала тому минимальному напряжению, при котором появлялся туннельный ток.

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ МЕЖДУ ДВУМЯ СВЕРХПРОВОДНИКАМИ

Исходя из тех же общих соображений, Гиавер поставил новые опыты с туннельным контактом двух различных сверхпроводников, обладавших энергетическими щелями различной ширины.

Такой контакт уже в привычной для нас форме изображен на рисунке 37, а. Там же показана его вольт-амперная характеристика (рис. 37, з).

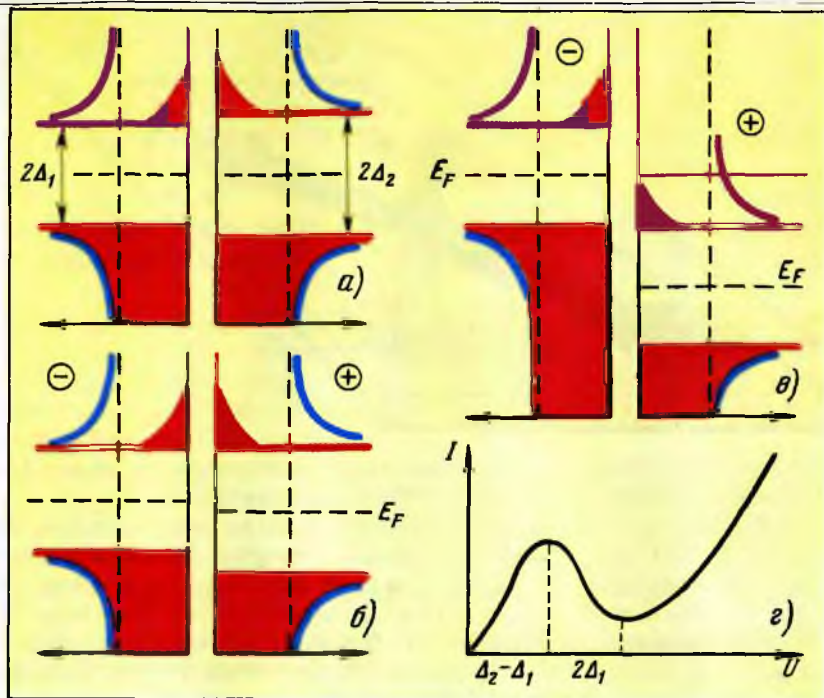


Рис. 37

При отсутствии напряжения на контакте уровни Ферми обоих металлов совпадают и верхний край щели в спектре сверхпроводника 1, например алюминия, ниже, чем у сверхпроводника 2 — свинца. Даже те немногие термически возбужденные электроны, которые находятся выше щели, переходить вправо не могут. Когда разность потенциалов на контакте постепенно повышается, эти «надщелевые» электроны проходят барьер во все больших количествах и ток возрастает. При напряжении  $eU = \Delta_2 - \Delta_1$  наблюдается максимум туннельного тока, так как все неспаренные электроны сверхпроводника 1 могут туннелировать направо, где им соответствует особенно большая плотность незанятых состояний. После того как сравняются верхние края щелей (рис. 37,б), ток начинает падать.

Здесь мы наблюдаем интересную особенность: участок с отрицательным наклоном, когда рост напряжения приводит к падению тока. Это свойство туннельных контактов открывает перед электроникой много новых возможностей, в частности, для генерации и усиления электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Любой электрический сигнал, проходя через цепь с сопротивлением, затухает, но здесь, наоборот, он должен усиливаться. Элемент находится в неустойчивом состоянии; он будет переходить из одного состояния в другое и обратно, генерируя тем самым электрические колебания.

Еще в 50-х годах нашего столетия японский физик Лео Езаки создал

полупроводниковый прибор — диод, у которого на вольт-амперной характеристике также наблюдалась область отрицательного сопротивления. Этот прибор, известный сегодня как полупроводниковый туннельный диод, получил широкое распространение в технике высоких частот и вычислительной технике. Интересными оказались и чисто научные применения туннельного диода. Возникла целая область науки — туннельная спектроскопия, которая позволила получить богатую информацию с помощью исследования туннельных явлений. Поэтому не случайно именно Езаки и разделил Нобелевскую премию по физике в 1973 г. с Гиавером и Джозефсоном.

Но вернемся к вольт-амперной характеристике туннельного сверхпроводящего контакта. После того как нижний край узкой щели сравнивается с верхним краем широкой (рис. 37,в), начнется резкое увеличение тока. Происходит это при  $eU = \Delta_2 + \Delta_1$ , теперь многочисленным «подщелевым» электронам сверхпроводника  $I$  ничто не мешает переходить направо. В этом резком повышении тока и состоит преимущество применения туннельного контакта из двух сверхпроводников. Такая картина позволяет нам интерпретировать появление туннельного тока при напряжении  $U = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{e}$

как результат разрыва куперовских пар. Приложенное напряжение должно быть по меньшей мере таким, чтобы обеспечивался разрыв пары на два электрона, один из которых находится в первом сверхпроводнике, а другой — во втором. Это и есть тот самый процесс, о котором мы говорим, — переход одной частицы через изолирующий слой. Возможность такого процесса появляется сразу же, как только напряжение достигает величины  $(\Delta_1 + \Delta_2) / e$ .

Но одно дело — сделать открытие, а другое — сделать из него правильные выводы. Гиавер первым наблюдал это явление, но он его не понял, посчитав результатом погрешности в изготовлении образцов. «Мы наблюдали этот эффект много раз, — вспоминал Гиавер, — действительно, невозможно не видеть этот ток... Однако у меня уже было готовое объяснение этого явления — сверхпроводящий ток шел через контакт по металлической закоротке или мостику. Правда, я был озадачен неожиданной чувствительностью этого тока к магнитному полю, однако никто не знал, как поведет себя в этой ситуации мостик длиной и шириной 20 Å... Таким образом, все образцы, которые показывали эффект Джозефсона, мы отбрасывали, как имевшие закоротки... С тех пор меня часто спрашивают, не ругал ли я себя за то, что проглядел этот эффект. Я твердо отвечаю «нет», так как, чтобы сделать открытие, мало наблюдать какой-то эффект, нужно понимать смысл и значение этого наблюдения, а в данном случае я и близко не подошел к этому».

К этим словам, подкупающим своей прямоотой, мало что можно добавить. Напомним только, что дело происходило в самом начале 60-х годов, теория сверхпроводимости лишь недавно была создана, и опыты Гиавера во многом способствовали ее становлению. Использование туннельной техники позволило получить полную и подробную информацию о величинах энерги-

тических щелей в сверхпроводниках, их зависимости от температуры, о влиянии на щель магнитного поля, тока, примесей. Именно опыты Гиавера подтвердили ту температурную зависимость ширины щели, которая предсказывалась теорией БКШ и была показана на рисунке 30.

## ТУННЕЛИРУЮТ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПАРЫ

Рассматривая свойства туннельного контакта между двумя сверхпроводниками, молодой английский физик, в то время еще студент-дипломник, Брайан Джозефсон пришел к выводу о существовании двух совершенно необычных эффектов, связанных с возможностью протекания через достаточно тонкий слой диэлектрика сверхпроводящих токов. Позже он вспоминал: «Я стал просматривать литературу и увидел, что постоянный сверхпроводящий ток уже, возможно, наблюдался. Гиавер знал про аналогичное явление, но припасал увиденные им сверхпроводящие токи проводимости через металлические закоротки, понижывающие барьерный слой».

Но Джозефсон не просто интерпретировал имеющийся экспериментальный результат — он его предсказал, открыл, как говорится, «на кончике пера» и детально описал постановку нужного опыта.

Основная идея Джозефсона была довольно проста, ее высказывали и раньше. Если отдельные электроны могут туннелировать через диэлектрический барьер между двумя сверхпроводниками, то почему бы не туннелировать и электронным куперовским парам, ведь ток при сверхпроводимости — поток именно таких пар. При описании тока каждую пару можно рассматривать как «одиночную» частицу массой  $2m$  и зарядом  $2e$ . Скорость такой частицы определяется скоростью центра масс. Как и в случае обычных частиц, эти носители тока можно описать с помощью волны; это волна электронной пары.

Замечательно, что пары не могут двигаться независимо друг от друга. Каждая пара, как уже говорилось, взаимодействуя со всеми остальными парами, должна двигаться *строго согласованно*. Подобная корреляция в движении куперовских пар приводит к их импульсной упорядоченности, при которой центры масс всех пар движутся с одним и тем же импульсом  $p = m\dot{r}$ . На волновом языке это означает, что все куперовские пары имеют одну и ту же длину волны  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

Строгая корреляция пар требует, однако, равенства не только длин волн. Фиксированной оказывается еще одна величина, уже не столь привычная для нас, как импульс или энергия, а именно *фаза*. Состояния электронных пар в сверхпроводнике характеризуются единой *волновой функцией*. Эта функция описывает распространение волн, связанное с движением частиц. Волновая функция, как и любая волна, имеет амплитуду и фазу. Поскольку электронные пары находятся в одном и том же состоянии (для них ведь не существует принципа запрета Паули), они должны быть согласованы по всем физическим параметрам, в том числе и по фазам.

О фазе сверхпроводника как целого не имеет смысла говорить: она не только ничего не определяет, но и сама вполне неопределенна. Но на соотношении (разности) фаз двух отдельных сверхпроводников необходимо остановиться.

Когда сверхпроводники далеки друг от друга, соотношение фаз хаотически меняется. В принципе они могут отличаться одна от другой на любую величину от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Попробуем теперь сблизить сверхпроводники. При достаточном сближении их волновые функции могут начать перекрываться в области зазора, разделяющего металла. Волновые функции пар в одном металле начинают как бы чувствовать приближение пар в другом. Этот зазор и представляет собой туннельный контакт. Благодаря обмену парами два сверхпроводника оказываются связанными между собой. При этом интенсивность и направление обмена определяются разностью фаз между системами, а сам туннельный ток следующим основным соотношением, полученным Джозефсоном:

$$I = I_0 \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  — разность фаз по обе стороны зазора в некоторой его точке, а  $I_0$  — максимальный туннельный ток, пропорциональный площади туннельного перехода и прозрачности барьера.

Мы не будем входить здесь в детали подтверждающих это соотношение количественных расчетов. Однако попытаемся внести в полученный результат некоторый элемент наглядности. Представьте себе маятники, связанные между собой очень слабой пружиной. Связь приводит к тому, что маятники как бы чувствуют колебания друг друга. Под влиянием одного из них другой маятник будет постепенно «возбуждаться». Благодаря связи происходит перераспределение колебательной энергии. При этом конечный результат зависит от фазовых соотношений между колебаниями маятников.

Когда колебания одного из маятников опережают колебания другого по фазе, то энергия передается от первого маятника ко второму. Поток энергии достигает максимума при разности фаз:  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . Если с опережением колеблется второй маятник, то энергия от него передается первому. При разности фаз  $0$ ,  $\pi$ ,  $2\pi$  и при одинаковых амплитудах маятников мы не имеем никакого потока энергии. В одном случае маятники качаются синфазно, а в другом — строго в противофазе.

Потоку энергии в нашей механической модели соответствует перенос куперовских пар через туннельный контакт. Пары переходят от одного сверхпроводника к другому, а затем возвращаются обратно по внешней цепи. При этом величина и направление тока определяются теми же фазовыми соотношениями, что и для слабосвязанных механических колебательных систем. Когда разность фаз лежит в пределах от  $0$  до  $\pi$  (соответственно от  $n\pi$  до  $(2n + 1)\pi$ ), возникает сверхпроводящий ток, направленный, скажем, от первого сверхпроводника ко второму. При разности фаз, равной  $0$  и  $\pi$ , нет никакого суммарного тока куперовских пар. Для разности фаз между  $\pi$  и  $2\pi$  ток куперовских пар будет течь в обратном направлении.

Конечно, рассмотренная нами механическая аналогия ни в коей мере не является доказательством соотношения, полученного Джозефсоном. Для нас важно, что мы установили зависимость потока энергии от разности фаз колебаний обоих маятников аналогично явлениям, наблюдаемым на туннельном контакте. Поток электронных куперовских пар зависит от разности фаз внутренних колебаний двух систем.

Это обстоятельство чрезвычайно существенно. Появляется устройство, в котором фаза волновой функции непосредственно определяет в твердом теле (впервые в физике!) такую тривиально измеряемую величину, как ток.

---

Физические приборы, действие которых основано на измерении или сравнении разности фаз, называются интерферометрами; интерференционные опыты — лучший способ осуществлять тонкие и точные физические измерения. Наиболее известны и употребительны оптические, световые интерферометры, которые служат основой определения стандартов единиц длины и времени. Физики полагают, что будущая система физических единиц может быть основана на измерениях, выполненных с интерферометрами двух типов — оптическими и джозефсоновскими.

Вот так неожиданно вошла в физику считавшаяся ненаблюдаемой фаза волновой функции.

Максимально возможная плотность сверхпроводящего тока пропорциональна максимальной энергии связи двух сверхпроводников на единицу площади перехода и зависит от толщины барьера. Таким образом, энергия связи также оказывается периодической функцией разности фаз  $\varphi$  на туннельном переходе:  $E = -E_0 \cos \varphi$ ;  $E_0 = \frac{\hbar}{2e} \frac{\pi \Delta}{2R_V}$ . Здесь  $\Delta$  — ширина энергетической щели (в случае двух одинаковых сверхпроводников), а  $R_V$  — сопротивление туннельного перехода в нормальном состоянии. Максимально возможная плотность сверхпроводящего туннельного тока достигает для типичных туннельных контактов величин 10...50 А/см<sup>2</sup>.

## ЭФФЕКТЫ ДЖОЗЕФСОНА

Итак, если туннельный контакт двух сверхпроводников включить во внешнюю цепь с источником тока, то разность фаз будет зависеть от величины тока и устанавливаться такой, чтобы удовлетворить соотношению  $I = I_0 \sin \varphi$ . Но обратите внимание на то, что в это выражение для тока никак не входит напряжение на контакте. Значит, если создана заметная разность фаз, то ток пойдет и в отсутствие напряжения? Оказывается, именно так! При нулевой разности потенциалов через туннельный контакт, образованный двумя сверхпроводниками, разделенными тонким слоем диэлектрика, может протекать постоянный ток. Это явление называют *стационарным эффектом Джозефсона*.

Вольт-амперная характеристика джозефсоновского туннельного контакта показана на рисунке 38. Выглядит она довольно странно. Вертикальная черточка при  $U=0$  и есть ток, предсказываемый соотношением Джозефсона. Эту черточку, кстати говоря, и видел неоднократно на своих вольт-амперных характеристиках Гиавер, но принимал ее за последствия закороток — металлических мостиков в образцах и выбрасывал эти образцы вместе с полученными кривыми.

Стационарный эффект Джозефсона был обнаружен уже в 1963 г., т. е. через год после предсказания Джозефсона. Его проверили прямым экспериментом Андерсон и Роуэлл благодаря найденной Роуэллом характерной зависимости полного тока через переход от магнитного поля. Зависимость эта весьма своеобразна — она периодична по полю и имеет вид, изображенный на рисунке 39.

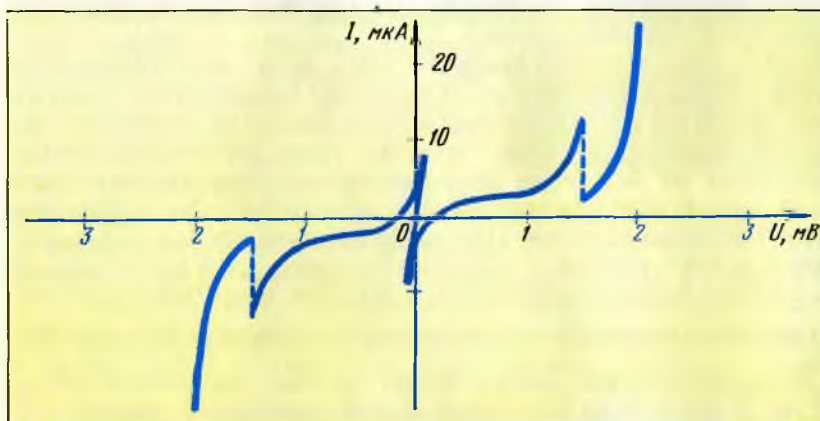


Рис. 38

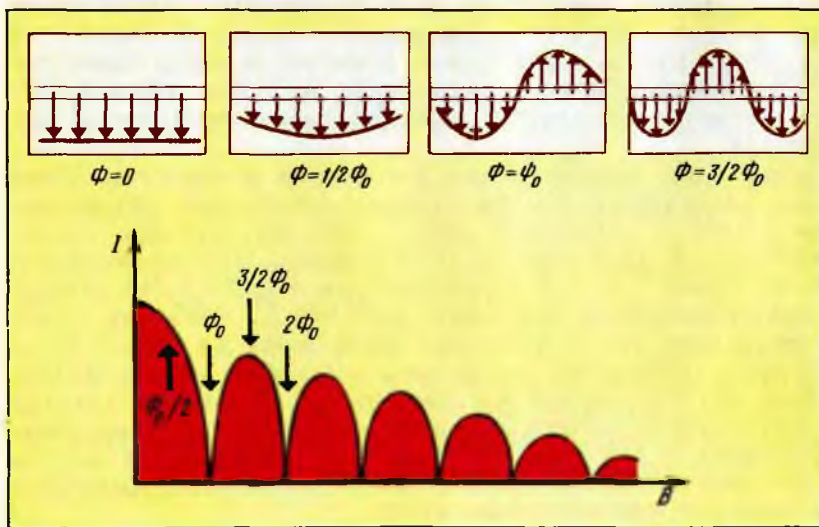


Рис. 39

Здесь мы вновь сталкиваемся с явлением квантования магнитного потока в сверхпроводниках. Ток исчезает всякий раз, когда переход содержит целое число квантов магнитного потока  $\Phi_0$ , и достигает максимума соответственно при половинном, полуторном и других значениях магнитного потока  $\Phi_0$ . С ростом числа квантов ток в максимуме становится все меньше; из рисунка 39,а, на котором изображены неподвижные волны тока Джозефсона, можно видеть, что все большее число полупериодов тока взаимно компенсируют друг друга при полущелых значениях отношения  $\Phi/\Phi_0$  ( $\Phi$  — магнитный поток в переходе).

Посмотрим теперь, что произойдет, если к джозефсоновскому туннельному контакту приложить постоянную разность потенциалов. Для этого случая Джозефсон предсказал еще более удивительный эффект, а именно при появлении постоянного напряжения  $I$  на туннельном контакте через него должен идти высокочастотный переменный ток. Это явление называют *нестационарным эффектом Джозефсона*.

Частоту переменного джозефсоновского тока легко подсчитать. При наличии разности потенциалов между двумя сверхпроводниками энергия двух систем куперовских пар по обе стороны от перехода отличается на величину  $\Delta E = 2eU$  ( $2e$  — заряд пары). Именно такое количество энергии может получить пара от источника напряжения при прохождении через диэлектрический слой. В обычном металле эта энергия была бы необходима для преодоления сил сопротивления. При протекании же сверхпроводящего тока не требуется затрат энергии, и полученная куперовской парой порция  $2eU$  излучается в виде кванта с энергией  $h\nu = 2eU$ . Это излучение с частотой  $\nu = \frac{2eU}{h}$  и было зарегистрировано в экспериментах с контактами Джозефсона.

Но излучать электромагнитные волны может только переменный ток — именно такой ток и течет через джозефсоновский туннельный контакт.

Таким образом, частота переменного тока определяется приложенным к контакту напряжением. При постоянном напряжении — переменный ток! Использование этого эффекта сулит весьма заманчивые перспективы для физики, электроники, измерительной техники. Но не будем забегать вперед — о замечательных возможностях джозефсоновских туннельных контактов речь впереди.

А пока отметим одно принципиальное техническое достоинство. Даже при очень малых напряжениях джозефсоновский туннельный контакт вырабатывает такие частоты, которые не всегда легко получить другими известными способами, — в диапазоне от сантиметровых волн до ближнего инфракрасного излучения. Так, при напряжении на контакте 1 МВ частота переменного джозефсоновского тока равна  $4,85 \cdot 10^{11}$  Гц (485 ГГц) — это почти полтриллиона герц, что соответствует длине волны 3,9 мм!

Экспериментально обнаружить нестационарный эффект оказалось значительно труднее, чем постоянный ток Джозефсона. Чрезвычайно малая мощность и очень высокая частота излучения, генерируемого туннельным контактом, усложняли и без того нелегкую экспериментальную задачу. Поэтому первое доказательство существования переменного джозефсоновского тока было получено косвенным путем.



Еще в первой своей работе Джозефсон предложил эксперимент, который вскоре осуществил американец Шапиро. Если туннельный контакт поместить в высокочастотное переменное поле, то на вольт-амперной характеристике можно наблюдать систему равноотстоящих почти вертикальных ступеней. Эти ступени возникают в результате наложения переменного джозефсоновского тока и высокочастотного поля. Каждый раз, когда частота джозефсоновского излучения становится кратной частоте поля, в результате наложения появляется дополнительный постоянный джозефсоновский ток, который и дает ступенчатую структуру вольт-амперной характеристики.

Еще один метод косвенного

измерения джозефсоновского излучения был предложен Гиавером. Его метод является более прямым в том смысле, что для регистрации излучения он использовал второй туннельный контакт, находящийся рядом с излучающим. Устройство, используемое Гиавером, схематично изображено на рисунке 40. Излучающим (джозефсоновским) является контакт между сверхпроводниками  $S_1$  и  $S_2$ . Оксидный слой между  $S_2$  и  $S_3$  делается толстым, таким, что на нем эффект Джозефсона наблюдаться не может. Эксперимент заключается в следующем. В отсутствие напряжения на контакте  $S_1 - S_2$  на контакте  $S_2 - S_3$  наблюдается типичная вольт-амперная характеристика одноэлектронного туннелирования, (см. рис. 34). При приложении к джозефсоновскому контакту небольшого напряжения возникает высокочастотный ток, и он становится генератором высокочастотного излучения. Кванты джозефсоновского излучения первого контакта  $S_1 - S_2$ , поглощаясь на втором, расщепляют в нем электронные пары, и на вольт-амперной характеристике должны появляться резкие изломы, соответствующие возрастанию тока. Именно такую «тонкую структуру» вольт-амперной характеристики и наблюдал Гиавер.

Прямую регистрацию излучения, испускаемого туннельным контактом, на частоте около 10 000 МГц (длина волны 3 см) удалось осуществить впервые советским физикам И. К. Янсону, В. М. Свистуну и И. М. Дмитренко в 1964 г. в Харьковском физико-техническом институте. Мощность излучения была порядка  $10^{-14}$  Вт. Спустя полгода излучение на тех же частотах было обнаружено и американскими физиками из Пенсильванского университета.

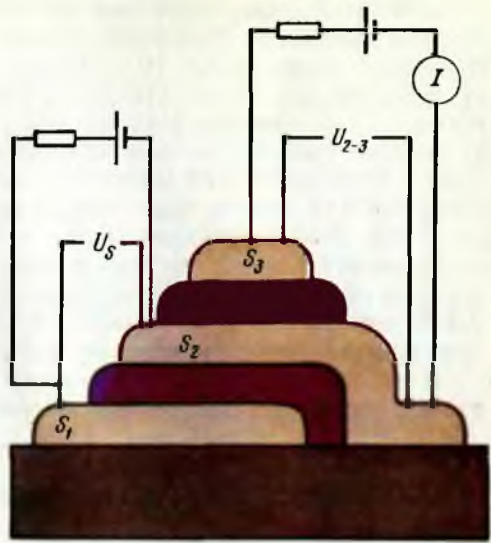


Рис. 40

Для этого туннельный контакт был помещен в полый волновод, погруженный в криостат. Излучение (его частота составляла 10 ГГц, а напряжение генерации было около 20 мкВ) по волноводу вырывалось наружу, где регистрировалось очень чувствительной электронной схемой. Во избежание всякого рода наводок система была окружена магнитной защитой. Специальными катушками компенсировалось даже влияние магнитного поля Земли. Регистрируемая мощность составляла около  $10^{-14}$  Вт, причем чувствительность можно было повысить до почти фантастической величины:  $10^{-16}$  Вт. Чтобы наглядно представить себе эту чувствительность, авторы эксперимента приводили следующее сравнение: наименьшая мощность, которую можно зарегистрировать, соответствует примерно такой световой мощности, какая попала бы в человеческий глаз от 100-ваттной лампы, удаленной примерно на 500 км!

В заключение еще раз отметим, что во всех случаях между частотой джозефсоновского излучения и приложенным к контакту напряжением наблюдалось соотношение  $\nu = \frac{2eU}{h}$ . Это еще раз убедительно доказывает ту важную роль, которую электронные пары играют в явлении сверхпроводимости.

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

---

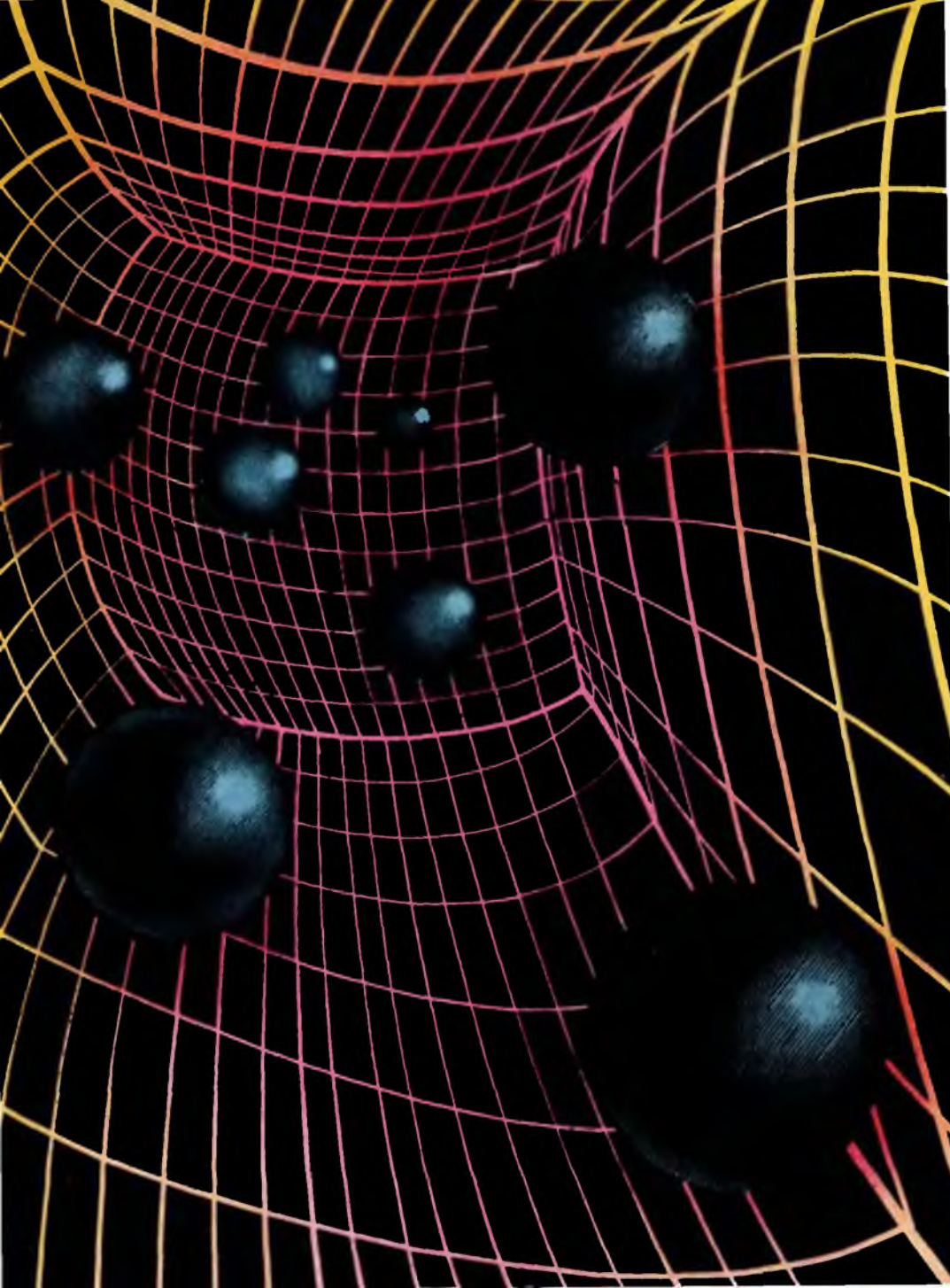
# ХОЛОДНЫЙ МИР СВЕРХПРОВОДНИКОВ

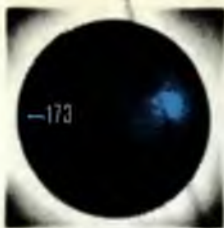
---

Не то, что мните вы, природа.  
Не слепок, не бездушный лик.  
В ней есть душа, в ней есть свобода.  
В ней есть любовь, в ней есть язык.

*Ф. Тютчев*

- ВНИЗ ПО ШКАЛЕ ТЕМПЕРАТУР
- СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ
- НА ПУТИ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ





Это та область, где человек существенно превзошел природу.

*Френсис Симон*

В наши дни низкие температуры — порядка нескольких градусов Кельвина — используются в самых разнообразных исследованиях. Они оказываются полезными и для физиков, изучающих свойства веществ, и для врачей, и для биологов. Вот уже много лет ведутся в этой области исследования, неизменно привлекающие внимание техники.

Широкое применение низких температур обусловлено, конечно, прогрессом криогенной техники, который сделал возможным получение жидких газов в больших количествах и проведение всевозможных экспериментов в специально разработанных криостатах. Именно с попыток превратить газ в жидкость и начинался путь к абсолютному нулю.

## СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Физиков давно интересовал вопрос, можно ли превратить в жидкость газы, такие, как воздух, кислород, водород.

Дело в том, что многие газы могут находиться в жидком состоянии лишь при очень низкой температуре. Жидкий газ, налитый в сосуд, испаряясь, отнимает подводимое снаружи тепло, и, пока остается хоть капля жидкого газа, температура поддерживается на уровне его температуры кипения.

Весьма важным параметром, определяющим сжижение газа, является давление. Первым это понял голландский физик Ван Марум. В конце XVIII в. Ван Марум, проводя эксперименты с аммиаком, с целью проверить справедливость закона Бойля—Мариотта заметил следующее. Вначале при уменьшении объема, занимаемого газом, давление газа, как и следовало ожидать, пропорционально увеличивалось. Когда давление достигло 7 атм ( $1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), произошло неожиданное — при дальнейшем сжатии давление не росло. В цилиндре появился жидкий аммиак, и количество жидкости при сжатии увеличивалось.

Именно по пути сжатия шли исследователи в своих попытках оживить газы. Здесь особо следует отметить планы Фарадея, начатые еще в те годы, когда он занимал скромную должность лаборанта у знаменитого английского химика Дэви. Изучая тепловое разложение химического соединения хлора, Фарадей в 1823 г. открыл чрезвычайно простой способ сжи-

жения газов. В результате химической реакции выделяется все большее количество исследуемого газа, его давление повышается, молекулы сближаются, благодаря чему увеличиваются силы сцепления. В конце концов газ сжижается. В своих последующих опытах в союзники давлению Фарадей взял холод. Таким путем были получены впечатляющие результаты — удалось перевести в жидкое состояние многие газы. Более того, некоторые известные газы были не только переведены в жидкое состояние, но и заморожены.

И все же целый ряд газов и среди них воздух, кислород, водород, азот не удавалось превратить в жидкость, как бы сильно их не сжимали и охлаждали. Можно было подумать, что атмосферные газы вообще не могут существовать в виде жидкости. Их так и стали называть «постоянными», т. е. принципиально не сжижаемыми.

---

На самом деле неудачи с атмосферными газами были вызваны непониманием одного важного обстоятельства, на которое впервые обратил внимание Фарадей. Он высказал гипотезу о существовании у каждого газа некоторой критической температуры, выше которой его нельзя превратить в жидкость ни при каком давлении. Причину этого загадочного явления вскрыл Д. И. Менделеев, но он подошел к этому явлению не с физической, а с химической стороны (может быть, по этой причине он не придал подобающего значения своим наблюдениям). Более подробно этот вопрос был рассмотрен шотландским ученым Эндрюсом. Эндрюс не только ввел особую характерную для каждого вещества критическую температуру, но и указал метод ее оценки. И наконец, в 1873 г. появилась первая физическая теория реального газа, разработанная голландским физиком Ван-дер-Ваальсом. Вместе с экспериментальными данными расчет по теории Ван-дер-Ваальса показал, что критические температуры для «постоянных» газов должны быть намного ниже комнатной температуры. У азота, например, она оказалась равной  $-147^{\circ}\text{C}$ , у кислорода  $-119^{\circ}\text{C}$ , у водорода  $-240^{\circ}\text{C}$ . Теперь понятно, что «постоянными» газами считали газы, которые пытались сжать при температурах выше критических, а это сделать невозможно ни при каких давлениях.

И вот в течение 70—80-х годов прошлого столетия, когда велась напряженная работа по получению низких температур, двум ученым, французу Кальете и швейцарцу Пикте, почти одновременно удалось получить жидкий кислород.

Кальете проводил опыты по сжижению ацетилена под высоким давлением. Во время одного из опытов стеклянный сосуд с газом случайно разгерметизировался и сжижаемый газ начал просачиваться наружу. И в этот момент Кальете, внимательно следивший за ходом опыта, успел заметить в сосуде легкое облачко, которое тут же исчезло. Еще и еще раз повторял он опыт, уже намеренно давая возможность газу просачиваться наружу. Картина повторялась. Теперь уже не было сомнений, что падение давления в результате утечки газа вызвало резкое охлаждение ацетилена и появившееся облачко — это сконденсировавшийся газ. Так был открыт

новый перспективный метод сжижения газов. Высокое давление в нем нужно было не само по себе, а лишь для того, чтобы привести газ в состояние готовности. Чем больше было давление, чем резче оно сбрасывалось, тем сильнее понижалась температура газа.

Сразу же после опытов с ацетиленом Кальете приступил к работе по сжижению атмосферных газов, начал он с кислорода. Сжав в толстостенном стеклянном сосуде кислород до 300 атм и охладив его, он резко сбросил давление. И вновь на какое-то мгновение в сосуде возникло легкое облачко тумана. Сомнений быть не могло — это были следы жидкого кислорода. Постоянным газам на сей раз устоять так и не удалось. Вскоре Кальете тем же способом произвел сжижение азота, а Пикте в Женеве получил жидкий кислород при температуре 130 К. При этом Пикте использовал метод предварительного охлаждения расширяющегося газа. Оказалось, чем сильнее предварительно охлажден газ, тем менее резко надо сбрасывать давление, чтобы достичь низкой температуры.

Метод Пикте получил название каскадного: в нем достижение низких температур производится не в один, а в несколько этапов. Впоследствии, когда список охлаждающих веществ увеличился, каскадный метод стал одним из основных. Сжижение газов производили ступенями: предварительно превращали в жидкость этилен, кислород, азот, водород — вещества с температурами кипения — 103, —183, —196, —253 °С. Сосед «слева» помогал получить соседа «справа».

Итак, «постоянство» атмосферных газов оказалось лишь кажущимся. Теперь предстояло получить жидкий кислород в устойчивом состоянии. Эта задача была решена польскими физиками Врублевским и Ольшанским. В 1883 г., спустя шесть лет после опыта Кальете, они наблюдали жидкий кислород, спокойно кипящий в испытательной трубке. Вскоре польские физики добились нового замечательного успеха — получили в устойчивом состоянии жидкий азот, а затем и жидкий воздух. Однако, несмотря на настойчивые попытки, им так и не удалось сжигать водород.

Водород оказался крепким орешком. Но физики — люди терпеливые, пятнадцать лет шел к этой цели профессор физики Королевского института в Лондоне Джеймс Дьюар. В 1898 г. он получил наконец первые капли жидкого водорода. Чтобы перекрыть температурный разрыв между точкой замерзания кислорода при 54 К и критической точкой водорода при 33 К, Дьюар использовал эффект Джоуля—Томсона: газ, пропущенный через какое-либо препятствие — дроссель, расширяется, совершая работу, и его температура падает.

Надо сказать, что Дьюару в известной степени повезло — природа шла навстречу исследователю. Дело в том, что температура газа за дросселем может оказаться и выше исходной. Все зависит от того, притягиваются или отталкиваются взаимодействующие молекулы реального газа. В определенной области исходных давлений и температур газа преобладают силы отталкивания, и он нагревается. При переходе к более низким давлениям и температурам начинают преобладать силы притяжения, и газ после прохождения через дроссель охлаждается. Так вот для водорода эта температура

оказалась равной 193 К, что значительно выше точки замерзания кислорода. Именно это обстоятельство и было использовано Дьюаром для достижения низких температур.

Для хранения низкотемпературных жидкостей Дьюар сконструировал сосуд, известный сегодня физикам всего мира как сосуд Дьюара. И не только физикам. Мы пользуемся им каждый раз, когда в дороге подкрепляемся горячим чаем или кофе. Речь, как вы догадались, идет о термосе. Один сосуд вставлен в другой, между ними откачан воздух: ведь чем меньше молекул, тем меньше теплопередача. А чтобы еще более снизить передачу тепла, оставшуюся за счет теплового излучения, стенки сосудов посеребрены, так что они отражают почти все падающее на них излучение. В таком сосуде, изумляя присутствующих, Дьюар демонстрировал им жидкий водород. Но определить температуру сжиженного водорода ученый не смог: ее просто нечем было измерить. Откалиброванный при температурах жидкого кислорода электрический термометр давал явно неверные показания. Но температура была столь низка, что газообразный кислород, опущенный в пробирке в сосуд с жидким водородом, сразу же превращался в твердое тело. Казалось, что это и есть последняя ступенька к абсолютному нулю (температура кипящего водорода оказалась равной 20 К). Так думал и сам Дьюар. Ему удалось получить водород даже в твердом состоянии — достигнутая температура составляла всего лишь 13 К. Ученый ошибся — температура ожиджения гелия оказалась еще ниже.

## КВАНТОВАЯ ЖИДКОСТЬ

Гелий был открыт в 1869 г. при исследовании спектра солнечной короны. Астрономы, француз Жансен и англичанин Локьер, обнаружили в солнечном спектре линию ярко-желтого цвета, которую нельзя было приписать ни одному из известных на Земле элементов. Лишь через 27 лет солнечный элемент был получен на Земле. Он оказался легким бесцветным инертным газом, которым впоследствии стали наполнять дирижабли. И конечно, мало кто в те времена мог представить себе, что с гелием будет связана одна из интереснейших страниц в истории физики.

«Строптивный характер» гелия начал обнаруживаться уже в первых экспериментах. Как только в распоряжении физиков появился жидкий гелий, они занялись изучением его свойств и сразу же столкнулись с тем, что он не похож ни на какую другую жидкость. Если начать откачивать пары жидкости, то при достаточно малом притоке тепла ее температура начнет падать и, наконец, вещество затвердеет. По-видимому, Камерлинг-Оннес ожидал, что это произойдет и с гелием, когда впервые в мире он стал откачивать пары полученной им новой жидкости. Но даже при разряжении до 0,01 атмосферного давления, которому отвечала температура 1 К, никаких признаков образования твердого гелия не обнаружилось. Гелий оставался жидким и при такой рекордно низкой температуре, как 0,83 К.

В первом же эксперименте Оннеса поразила очень малая плотность



жидкого гелия. Он оказался в 8 раз легче воды; это говорит о том, что легкие атомы гелия находятся на относительно большом расстоянии друг от друга. Перевести такую жидкость в твердое состояние гораздо сложнее, чем обычные жидкости.

Гелий часто называют *квантовой жидкостью*. В самом деле, с точки зрения классической физики уникальное поведение жидкого гелия при низких температурах совершенно непонятно. Ведь с понижением температуры колебания частиц становятся все слабее и слабее. Наличие межмолекулярных сил должно в конце концов приводить к затвердеванию вещества. Опыт показывает, что именно таким образом ведут себя все вещества. Все, кроме гелия.

Поведение жидкого гелия не имеет ничего общего с этой картиной. Гелий остается жидким вплоть до самых низких температур. Но даже вблизи абсолютного нуля он остался бы жидким, поскольку здесь его затвердеванию препятствуют законы квантовой механики. Согласно этим законам обычное представление о полной остановке атомов оказывается неверным: даже при абсолютном нуле атомы совершают колебания, которые не связаны с тепловым движением.

Конечно, наличие «неотнимаемой» при абсолютном нуле энергии не является особым свойством гелия. Нулевая энергия имеется у всех веществ, только у гелия этой энергии оказывается достаточно для того, чтобы помешать атомам образовать кристаллическую решетку. (Лишь при дополнительном сильном сжатии гелий может стать твердым.)

И еще одна особенность имеется у этой удивительной жидкости. Гелий при температуре выше 2 К (точнее, 2,19 К) и гелий ниже этой температуры — это совсем разные жидкости. Выше двух градусов гелий представляет собой обычную жидкость, называемую *гелием I*. Ниже этой температуры обнаруживаются чудеса: скачком меняется ряд физических свойств — теплоемкость, скорость распространения звука, коэффициент теплового расширения и др. Чудесный гелий называют *гелием II*.

Самое поразительное свойство гелия II — это полное отсутствие вязкости. В 1938 г. советский физик П. Л. Капица обнаружил, что гелий течет по узкому капилляру без всякого сопротивления, он способен даже «вылезать» из стакана или пробирки, куда он налит. Такое свойство гелия II было названо *сверхтекучестью*.

Эффект сверхтекучести аналогичен явлению сверхпроводимости. В сверхпроводниках электронная жидкость движется сквозь решетку кристалла, не обмениваясь с ней энергией и не испытывая сопротивления. Жидкий гелий II также протекает по капилляру без сопротивления, т. е. силы трения строго равны нулю.

Сверхтекучесть «моложе» сверхпроводимости. Однако если сверхпроводимость почти полвека оставалась загадкой для ученых, то природа сверхтекучести стала понятной уже через три года после его открытия, когда Л. Д. Ландау создал теорию сверхтекучести.

Мир оценил значение этих открытий. Нобелевская премия, выданная советским физикам, ознаменовала этот важнейший вклад в науку.

Надо сказать, что в своих экспериментах с жидким гелием Камерлинг-Оннес фактически наблюдал переход жидкого гелия в новое сверхтекучее состояние, но он не сумел оценить сделанного им открытия. И это понятно: чтобы объяснить поведение жидкого гелия при низких температурах, требовался радикально новый подход, отказ от представлений классической физики. Это могли сделать и сделали только физики следующего поколения.

## ТЕХНИКА ГЕЛИЕВЫХ ТЕМПЕРАТУР

Получить жидкий гелий можно различными способами. На рисунке 41 изображена схема сжижителя с предварительным водородным охлаждением и расширением через вентиль. Гелий, сжатый до большого давления, из компрессора поступает в теплообменник, где охлаждается жидким водородом. Охлажденный сжатый гелий, пройдя через вентиль  $K$ , попадает в приемник, где резко расширяется и охлаждается. Пока температура гелия в приемнике выше критической, конденсации не происходит и охлажденный гелий возвращается в компрессор через теплообменник. В теплообменнике этот гелий охлаждает дополнительно идущий ему навстречу сжатый гелий, так что новая порция газа, попадающего в приемник, имеет более низкую температуру, чем предыдущая. Таким постепенным охлаждением можно добиться того, что температура гелия, расширяющегося в приемнике, станет равной критической и гелий перейдет в жидкое состояние.

Образовавшийся жидкий гелий через выходной вентиль  $K$  попадает в сосуд Дьюара. Именно по такой схеме и был впервые получен жидкий гелий. Способ этот хотя и прост, но не очень удобен. Нужно иметь фактически две установки: для водорода и для гелия. Да еще водород опасен: достаточно появиться утечке водорода, и он, смешавшись с воздухом, образует гремучую смесь. К счастью, есть способ обойтись без водорода.

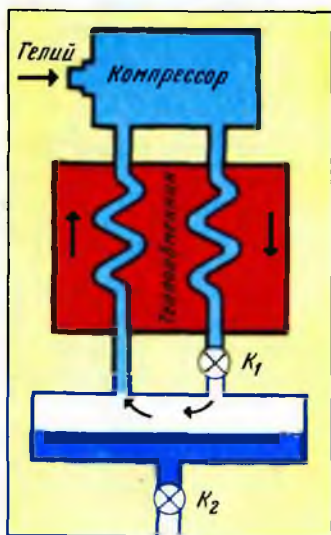


Рис. 41

Чтобы охладить гелий, надо заставить его поработать. Сделать это можно так: предварительно сжать гелий в компрессоре, подождать, пока он остынет, а потом открыть ему путь в цилиндр, где он, как пар в паровой машине, будет толкать поршень. В холодильной технике такое устройство называют *детандером*. В гелиевом сжижителе используется как поршневой детандер, так и дроссель (рис. 42).

Немало хлопот доставляет хранение жидкого гелия. Задача эта непростая: теплота испарения гелия настолько мала, что тепловой поток в 1 Вт может испарить 1,5 л гелия в час.

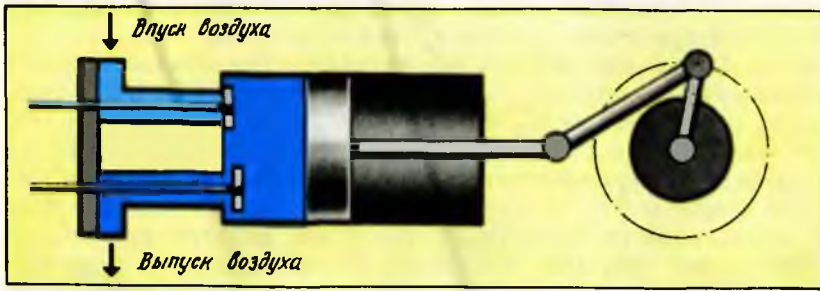


Рис. 42

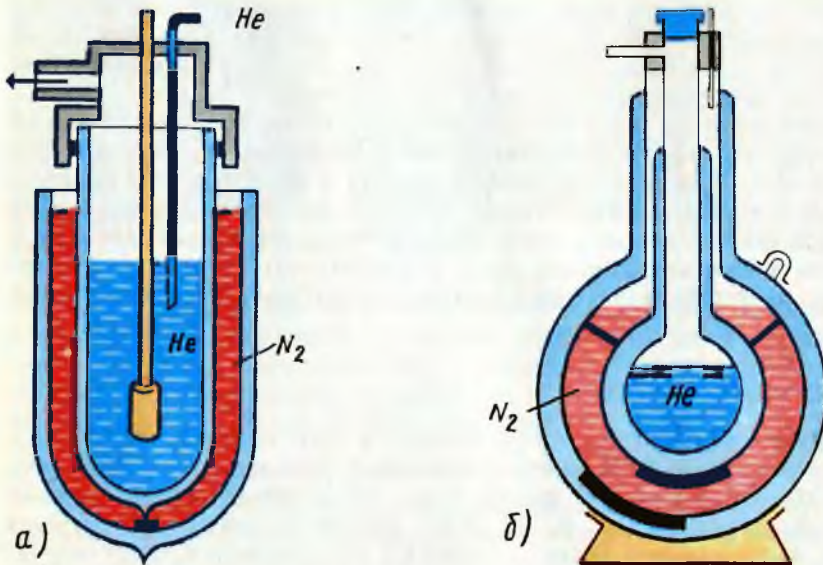


Рис. 43

Единственный выход — использовать для теплоизоляции пустоту. Выход хорош, но цена его высока, так как вакуумная техника предъявляет очень серьезные требования к конструкции приборов, их изготовлению и работе с ними. Впрочем, простейший стеклянный криостат не так уж сложен (рис. 43, а). Он представляет собой сосуд Дьюара 1, размещенный в другом аналогичном сосуде 2. Внутренний сосуд закрывается крышкой 3 и откачивается насосом 4. Охлаждаемое тело подвешивается к крышке, там же предусматриваются вводы проводов для питающих и измерительных устройств.

Стеклянные криостаты очень удобны тем, что в них можно заглянуть. Но, к сожалению, у них два серьезных недостатка: из стекла трудно делать сосуды сложной формы и большого объема и оно хрупко. Если в стекле появится трещинка, то последствия могут быть довольно неприятными — газ попадет в вакуумную рубашку, теплоприток резко возрастет, гелий

мгновенно вскипит и криостат может взорваться. Поэтому сейчас все больше используются криостаты, изготовленные из металла.

На рисунке 43, б показана типовая конструкция металлического криостата. Она отличается от стеклянного только элементами конструкции. Ванны для гелия и азота сделаны из меди, потому что ее легко обрабатывать. Но у нее высокая теплопроводность, поэтому вся конструкция подвешена на тонкостенных трубках из нержавеющей стали — материала, плохо проводящего тепло. Для поддержания высокого вакуума во время эксплуатации сосуда в него закладывается активированный уголь, который при низких температурах поглощает (абсорбирует) значительное количество газа. Поскольку большая часть тепла, вызывающего испарение жидкости в криостате, идет через его горловину, то она должна быть возможно более длинной. Из такого криостата, предназначенного специально для хранения гелия, испаряется всего 1...2% от емкости сосуда в сутки. После заполнения криостата его можно транспортировать на любые расстояния.

На этом можно было бы и закончить главу, но трудно удержаться от соблазна, чтобы не сказать несколько слов о способах получения сверхнизких температур — температур много меньше 1 К. Такие температуры можно получать только в лаборатории: нигде в природе нет температуры ниже 3 К. Все происходящее в этой области температур явления, хотя и предусмотрены законами природы, были осуществлены впервые благодаря разуму. И это делает физику низких температур особенно привлекательной.

## ГЛУБОКИЙ ХОЛОД

Самая низкая температура, получающаяся при откачке паров жидкого гелия, — порядка 1 К. Ценой значительного усложнения прибора, помещая один гелиевый дьюар в другой, тоже заполненный гелием, удалось добраться до температуры 0,7...0,8 К. И это предел: мешает сверхтекучесть гелия. А вот легкий изотоп гелия — гелий-III не становится сверхтекучим до очень низких температур порядка  $10^{-3}$  К. Гелий-III менее плотен, чем обычный гелий, кипит при более низкой температуре, и теплота испарения у него много меньше. Откачивая пары гелия-III, можно добраться до температуры порядка 0,3...0,5 К. Но когда физики изучили, что происходит, если смешать гелий-III и обычный гелий, то нашли способ понизить температуру еще ниже. Это позволило создать очень эффективную холодильную машину, называемую криостатом растворения, с помощью которой удается получить температуры порядка тысячных долей кельвина. Другой способ получения сверхнизких температур — *магнитное охлаждение*. Еще в 1926 г. ученые пришли к заключению, что температуры ниже 1 К могут быть достигнуты путем использования магнитных свойств парамагнитных солей.

Парамагнетики обладают свойством намагничиваться во внешнем магнитном поле. Ионы парамагнитной соли можно представить себе как элементарные микроскопические магнитики. В достаточно сильном магнитном поле все они оказываются выстроенными по полю, так сказать, стрелкой на

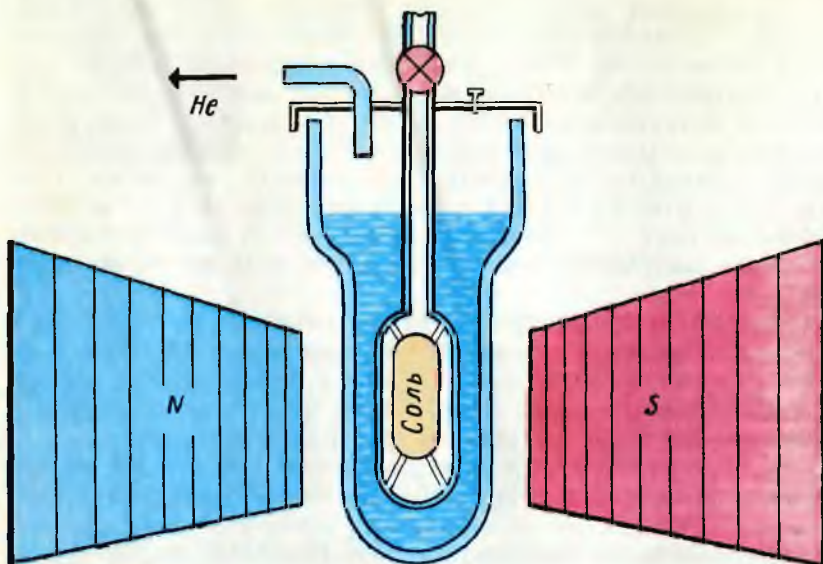


Рис. 44

юг. Возникает порядок, который не может сохраниться без поля. Под действием теплового движения магнитики изменяют свое направление и стремятся расположиться хаотично — вещество размагничивается. Если размагничивание происходит адиабатически, т. е. в условиях теплоизоляции, то температура парамагнетика понижается.

Практически магнитное охлаждение осуществляют следующим способом. Парамагнитная соль, например сульфат гадолиния, подвешивается на малотеплопроводной нити в сосуде, который помещается в криостат с жидким гелием (рис. 44). Сам криостат размещен между полюсами сильного электромагнита. Откачкой паров гелия температура в криостате поддерживается на уровне примерно 1 К (применение жидкого гелия-III позволяет снизить исходную температуру до 0,3 К).

При подаче в обмотку электромагнита тока соль намагничивается и ионы-магнитики располагаются в направлении силовых линий магнитного поля. При этом затрачивается энергия и выделяющееся тепло передает жидкому гелию газообразный гелий, заполняющий сосуд. Перед выключением поля газ из сосуда откачивают и соль таким образом теплоизолируют от жидкого гелия. Затем магнитное поле медленно выключают, и, как только оно становится достаточно слабым, ионы-магнитики, получив свободу, вновь располагаются как угодно. Но для этого необходима энергия, которая отнимается у самой соли. Таким образом, размагничиваясь, соль охлаждается и ее температура может достичь тысячных долей кельвина.

Каждый новый шаг на пути к абсолютному нулю сопряжен с огромными техническими и технологическими трудностями, поскольку требует создания

новых методик охлаждения, новых сложных установок. Сегодняшний рекорд — температура, отличающаяся от абсолютного нуля всего лишь на 27 миллионных долей кельвина. Такую температуру японским физикам удалось получить, применяя последовательно различные методы охлаждения. На последнем этапе использовался метод *ядерного размагничивания*. Ядра атомов также отчасти подобны маленьким магнетикам, которые из-за теплового движения ориентированы хаотично. Если включить магнитное поле, ядра-магнетики выстроятся по полю, т. е. тепловое движение как бы заморозится. После выключения поля снова должна возникнуть хаотичная ориентация, что потребует поглощения тепла. Значит, при этом возможно понижение температуры.

К этому нужно добавить, что ядра с трудом забирают тепло от окружающих частиц — электронов и ионов. Поэтому ядра можно охладить и до значительно более низких температур, исчисляемых миллиардными долями кельвина. Однако передавать такой холод электронам пока еще не умеют и физики вынуждены довольствоваться температурой 27 мК.

Может возникнуть вопрос: зачем нужны такие температуры и что можно ожидать от проникновения в эту новую область микрокельвинных температур?

Получение сверхнизких температур, конечно, не является самоцелью. Продвижение к абсолютному нулю позволяет обнаружить новые интересные физические явления, исследовать поведение необычных фаз вещества. Здесь в принципе возможны самые неожиданные сюрпризы. Например, ученые предполагают обнаружить сверхпроводимость ряда нормальных металлов (золота, платины), причем возможно, что эта сверхпроводимость будет носить иной характер, чем наблюдавшаяся до сих пор.



В мире этом —  
Я знаю — нет счета сокровищам.

*Л. Мартынов*

Уже вскоре после открытия сверхпроводимости у ртути Камерлинг-Оннесу и его сотрудникам удалось показать, что и другие металлы, например свинец и олово, могут переходить в сверхпроводящее состояние. Позднее были открыты сверхпроводящие свойства индия, галлия, таллия, а в 30-х годах с разработкой новых методов глубокого охлаждения число сверхпроводников пополнилось алюминием, цинком и другими элементами.

Поиски новых сверхпроводников продолжаются и сегодня, но уже не среди химических элементов, а среди огромного разнообразия сплавов и других классов веществ. И надо сказать, что эти поиски ведутся в известной мере без надлежащих ориентиров.

## ЯВНОЕ И СОКРОВЕННОЕ

На сегодняшний день известно почти сорок химических элементов, обнаруживающих сверхпроводимость.

Но вот удивительное дело! Среди металлов, обладающих при нормальных температурах высокой электропроводностью, сверхпроводники почти не встречаются. Такие элементы, как золото, серебро, медь, не сверхпроводники. А ведь это лучшие проводники электричества, и, казалось бы, они легче других веществ должны переходить в сверхпроводящее состояние. Но именно в этих металлах, вопреки всеобщим ожиданиям, сверхпроводимость не была обнаружена. Между тем, исходя из теоретических предпосылок, с которыми мы познакомились, нет никаких препятствий для того, чтобы все металлы были сверхпроводниками. Можно выдвинуть предположение, что у многих металлов сверхпроводимость не обнаружена, так как они были исследованы в недостаточно чистом состоянии и при недостаточно низких температурах. Возможно! Но и здесь не все ясно. Для многих металлов возникновение сверхпроводимости и температура перехода в сверхпроводящее состояние не зависели от степени загрязненности их примесями, в других же сверхпроводимость удалось обнаружить, лишь когда они были получены в очень чистом виде.

Температура перехода в сверхпроводящее состояние зависит не только

от химического состава вещества, но и от структуры самого кристалла. Известно, что кристаллы многих веществ могут существовать в различных модификациях. Эти модификации отличаются своими физическими свойствами. Например, одна из модификаций висмута может быть несверхпроводящей вплоть до очень низких температур, в то время как многие другие модификации обнаруживают сверхпроводимость. А вот бериллий, например, интересен тем, что является сверхпроводником только в том случае, когда он приготовлен в виде тонкой пленки. Некоторые элементы становятся сверхпроводящими только под давлением.

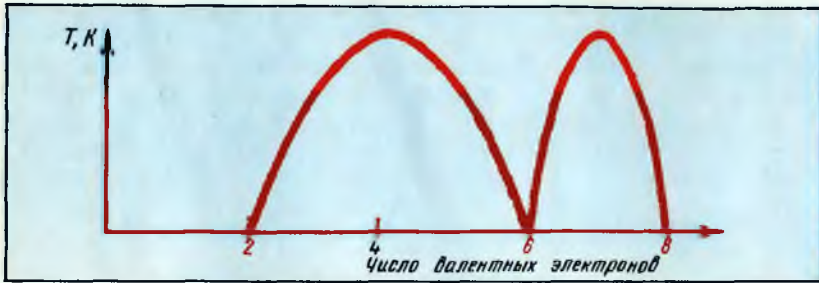
Здесь мы сталкиваемся с проблемой, решить которую пока не удалось. Физики не могут достаточно обоснованно ответить на вопрос, окажутся ли определенные металлы сверхпроводниками при сколь угодно низких температурах. Конечно, проводя эксперименты в более низкой температурной области, может быть, и удастся обнаружить новые сверхпроводники, но нет никаких очевидных предположений, чтобы предсказывать, какой материал должен стать сверхпроводящим, а какой нет.

Впрочем, качественно можно понять, почему такие металлы, как медь, серебро, золото, не являются сверхпроводниками. Один из основных механизмов электрического сопротивления — взаимодействие электронов с кристаллической решеткой. Именно это взаимодействие при определенных условиях приводит к отсутствию сопротивления, к сверхпроводимости. Поэтому поведение таких металлов не кажется странным; в обычных условиях они являются хорошими проводниками, однако сверхпроводимость в них не наблюдается. Ведь хорошая проводимость говорит о малой величине электрического сопротивления и, таким образом, о весьма слабом взаимодействии электронов с решеткой. Такое слабое взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля достаточного межэлектронного притяжения, поэтому и не происходит переход в сверхпроводящее состояние.

Физики уже давно подметили, что существуют определенные условия, которые, видимо, способствуют появлению сверхпроводимости. Так, например, было показано, что большую роль может играть атомный объем, т. е. объем, который приходится в металле на каждый атом. Действительно, если отложить на графике значения атомного объема в зависимости от порядкового номера элемента, то можно установить, что почти все сверхпроводники (за малым исключением) расположены в области малых значений атомного объема. Это очень интересно, однако ясного представления о том, как связан (и связан ли вообще) атомный объем со сверхпроводимостью, у нас пока нет.

Для предсказания сверхпроводимости и значения температуры перехода весьма плодотворное эмпирическое правило было предложено американским физиком Маттиасом. Согласно этому правилу решающее значение для сверхпроводимости вещества имеет среднее число валентных электронов. Оказывается, для того чтобы быть сверхпроводником, металл или сплав должен иметь от 2 до 8 электронов на атом. Особенно благоприятна ситуация, когда число валентных электронов на атом в среднем составляет 4,7 или 6,4, тогда критическая температура особенно велика. Сверхпроводимости





мость при этом могут обнаруживать и такие сплавы, в которых компоненты сами по себе не являются сверхпроводниками, лишь бы среднее число валентных электронов на атом попадало в указанные пределы. Наименее благоприятная ситуация, когда это число составляет 2,4 или 5,6, тогда критическая температура особенно низка и, может быть, даже вовсе равна абсолютному нулю. Схематически зависимость температуры перехода в сверхпроводящее состояние от числа валентных электронов показана на рисунке 45. Что касается влияния конкретного типа структуры кристаллов на сверхпроводимость, то здесь в общем не выявляется отчетливой закономерности. Кристаллы сверхпроводниковых материалов имеют самые разнообразные структуры, и значения критической температуры с видом структуры не коррелируют.

Вот мы опять, но уже с иных позиций пришли к заключению, что сверхпроводимость является весьма общим свойством металлов. К сожалению, мы еще далеки от истинного понимания этой связи. Теория БКШ не отвечает на вопрос о том, почему не все металлы являются сверхпроводниками, и не может предсказать сверхпроводящие свойства того или иного металла или сплава. И хотя основные положения теории сверхпроводимости, безусловно, правильно отражают сущность явления, связь сверхпроводимости с параметрами металла все еще остается неразрешенной проблемой.

## СПЛАВЫ И СОЕДИНЕНИЯ

Изучение сверхпроводящих материалов представляет интерес в двух аспектах: в теоретическом (для более глубокого понимания явления сверхпроводимости) и в прикладном.

Долгое время объектами для исследования явления сверхпроводимости служили материалы, практическое применение которых резко лимитировалось очень низкой критической температурой и довольно слабым критическим полем. Одно время перспективным материалом считался ниобий. Этот светло-серый металл почти так же плотен, как медь, латунь, никель. У ниобия наивысшая температура перехода среди чистых элементов — 9,2 К. Он также обладает способностью передавать это свойство «по наслед-

<i>Материал</i>	$T_c, K$	$B_{к, Тл}$ при $T = 4 \cdot 2 K$
Nb — Zr	9—11	7—9
Nb — Ti	8—10	9—13
Nb <sub>3</sub> Sn	18	22—25
Nb <sub>3</sub> Al <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	~20	40
Nb <sub>3</sub> Ga	~20	34
Nb <sub>3</sub> Ge	23.2	37
V <sub>3</sub> Ga	14.5	21
V <sub>3</sub> Si	17	23
Me <sub>x</sub> Mo <sub>6</sub> S <sub>8</sub>	10—14	50—60

Рис. 46

ству» своим сплавам и соединениям. Однако критические поля у ниобия все же недостаточны для его широкого применения (первое поле около 0,16 Тл, второе — 0,24 Тл), поэтому этот материал в чистом виде не всегда перспективен.

Сам ниобий применяется теперь не так часто, как прежде, но тем не менее использование его сильно возросло. В 1961 г. американский физик Кунцлер, исследуя сплав ниобия с оловом — Nb<sub>3</sub>Sn, обнаружил совершенно фантастические сверхпроводящие свойства этого соединения. Кусочек проволоки Nb<sub>3</sub>Sn оставался в сверхпроводящем состоянии в магнитном поле индукцией 8,8 Тл даже в том случае, когда одновременно по этой проволоке пропускали ток плотностью 1000 А/мм<sup>2</sup>.

С тех пор было открыто и изучено более двух тысяч сверхпроводящих сплавов и соединений, и их число продолжает расти. Во многих лабораториях мира ведутся активные поиски сверхпроводников с более высокими критическими параметрами, в первую очередь с высокой критической температурой. Однако из всего многообразия известных сверхпроводников интерес для технического освоения представляет лишь небольшое число сплавов и интерметаллических соединений, в которых числа атомов металлов находятся в простых соотношениях.

По таблице на рисунке 46 можно судить о критических параметрах сверхпроводников, представляющих практический интерес. В основном это сплавы и соединения ниобия с цирконием, титаном, оловом, германием. Эти вещества переходят в сверхпроводящее состояние при достаточно высоких температурах и могут выдерживать довольно сильные магнитные поля, исчисляемые десятками тесла. Велики также их критические токи. Так, в жидком гелии при внешнем поле индукцией 2,5 Тл для Nb-Zr, критическая плотность тока составляет 1 кА/мм<sup>2</sup>, для Nb-Ti — 2,5, Nb<sub>3</sub>Sn — 17, V<sub>3</sub>Ga — 5 кА/мм<sup>2</sup>.

Преимущества сверхпроводящих материалов на основе интерметаллических соединений, таких, как  $Nb_3Sn$ ,  $V_3Ga$  и др., были оценены и физиками, и технологами с самого начала работ по прикладной сверхпроводимости. Однако широкое применение этих материалов долгое время сдерживалось прежде из-за чрезвычайной их хрупкости. Хрупкость создавала большие трудности при получении изделий необходимых форм и размеров. Однако очевидные преимущества интерметаллических соединений стимулировали интенсивное развитие работ по получению на их основе технических сверхпроводников. Но путь к ним оказался нелегким.

## С ПОМОЩЬЮ ПИННИНГА

Нам уже приходилось говорить о том своеобразии электромагнитных свойств, которое присуще сверхпроводящим сплавам. В сплавах — сверхпроводниках II рода магнитное поле обычно не сразу заполняет весь объем образца. В толще его вначале образуются лишь отдельные сгустки линий индукции магнитного поля, и сверхпроводник переходит в особое состояние, которое А. А. Абрикосов назвал *смешанным*.

Когда сверхпроводник находится в смешанном состоянии и по нему течет ток, то в тех областях, где имеется магнитное поле (это сердцевинки вихрей, см. рис. 17), возникают силы взаимодействия между током и полем. В результате распределение тока изменяется, но и области, в которых сосредоточено магнитное поле, не остаются неподвижными, а начинают перемещаться.

Абрикосовские вихри под действием тока движутся! Но это — перемещение нормальной, несверхпроводящей сердцевинки. При таком движении возникает своеобразное трение, которое приводит к выделению тепла. Значит, при протекании тока через сверхпроводник, находящийся в смешанном состоянии, все-таки появляется сопротивление; как говорят физики, сверхпроводник переходит в резистивное состояние. Использовать такие сверхпроводники для технических целей нельзя.

Как же выйти из положения? Сверхпроводник, как оказалось, можно спасти. Надо только помешать вихрям двигаться, закрепив их на месте. Сделать это можно, создав в образце крупные неоднородности, дефекты. Отдельные вихревые нити притягиваются к этим дефектам и закрепляются на них. Это явление получило название *пиннинга* (от английского слова *pin*, что означает «прикалывание»).

Дефекты кристаллической решетки могут быть весьма разнообразными. Они могут иметь различные размеры, могут быть по-разному ориентированы относительно направления вихревых нитей. От их вида зависит лишь сила закрепления, а от концентрации — общее число закрепленных вихревых нитей. Чем больше дефектов, тем большее число нитей закреплено.

Не надо думать, однако, что описанный процесс закрепления нитей носит чисто механический характер. В сущности, закрепление вихревой нити на дефекте означает, что электромагнитное взаимодействие между

нитью и дефектом создает некоторый энергетический барьер, который нить должна преодолеть, чтобы начать двигаться. Вихревые нити приходят в движение только в том случае, если воздействие магнитной силы оказывается достаточным для того, чтобы преодолеть пиннинг и оторвать нити от неоднородности. Вот почему до определенного значения тока нити остаются неподвижными, электрическое сопротивление при этом равно нулю.

Благодаря пиннингу можно получить сверхпроводящие материалы с высоким значением как критического поля, так и критического тока. При этом если значение критического поля определяется свойствами самого материала, то значение критического тока (точнее, его плотности) во многом зависит от способа изготовления, методов обработки материала.

Процесс изготовления сверхпроводящих материалов должен отличаться технологичностью. Это необходимо потому, что технический сверхпроводник с большим количеством нитей, как правило, является сложной (компонитной) системой, состоящей из материалов с различными механическими, электрическими, теплофизическими свойствами. Он содержит от десятков до многих тысяч скрученных сверхпроводящих нитей (жил) диаметром до нескольких микрон и толщиной прослоек нормального металла между нитями около одного микрона. Для создания таких композиционных сверхпроводников потребовались совершенно новые металлургические методы, специальное оборудование и оснастка. Несмотря на имеющиеся трудности, уже найдены достаточно удобные технологические решения, которые позволили наладить выпуск широкого ассортимента сверхпроводящих материалов с хорошими критическими параметрами.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сегодня наша промышленность выпускает сверхпроводящие проволоки и ленты для самых различных нужд.

Во всех крупных сверхпроводящих магнитных системах, изготовленных в последние годы, использованы материалы на основе ниобий-титанового сплава. Этот сплав завоевал лидирующее положение среди технических сверхпроводников главным образом из-за своей технологичности как в производстве проводов, так и при изготовлении из них магнитов. Достигнутыми к настоящему времени успехами прикладная сверхпроводимость во многом обязана именно этому материалу, на основе которого и создают так называемые композиционные сверхпроводники

В бруске меди просверливают множество отверстий и туда вводят стержни сверхпроводника. Затем брусок вытягивают в длинную проволоку, которую разрезают на куски и снова вводят в медный брусок. Эту операцию повторяют многократно: вытягивают проволоку, разрезают на куски и т. д. В результате получается кабель, содержащий до миллиона сверхпроводящих жил, из которого и наматывают катушки для электромагнитов. В таком кабеле сверхпроводящий ток распределяется по всем жилам. Для сверхпроводника даже медь является хорошим изолятором — при парал-

тельном соединении медного и сверхпроводящего проводников весь ток течет по сверхпроводнику. Это и неудивительно, ведь ток выбирает путь с наименьшим сопротивлением. А если в какой-то жиле сверхпроводимость случайно разрушится, то в момент перехода сверхпроводника в нормальное состояние ток пойдет по обходному пути — через медную матрицу, поскольку ее сопротивление в этот момент будет ниже. При этом выделяется тепло, которое необходимо отвести, иначе весь кабель перейдет в нормальное состояние. Медь — хороший теплопроводник, и она успешно справляется с этой задачей, осуществляя термическую стабилизацию. В первых экспериментальных кабелях с такой стабилизацией применяли не очень много меди, но впоследствии, когда эти кабели начали использовать в промышленных установках, потребовалась более надежная страховка. И теперь изготавливают кабели, в которых сечение матрицы из меди во много раз превышает полное сечение сверхпроводящих проволок.

Кабель представляет собой медную матрицу с запрессованными в нее тончайшими проволочками. Но изготовить такой кабель, а лучше сказать, композитный сверхпроводник, — дело далеко не простое. Особенно, если иметь дело не со сплавами, а с интерметаллическими соединениями, например с  $Nb_3Sn$ , который обладает более высокими характеристиками, нежели  $NbTi$ . Но вот задача:  $Nb_3Sn$  хрупок и получить из него достаточно длинные и тонкие проволоки практически невозможно.

Лишь сравнительно недавно после многих попыток у нас в стране и за рубежом были разработаны методы изготовления сверхпроводников с большим количеством нитей интерметаллоида. Эти методы получили название бронзовой технологии. Вначале прессованием и волочением создается композит из тонких нитей ниобия в матрице из бронзы (медь плюс 10...13% олова). Ниобий в отличие от  $Nb_3Sn$  пластичен, и тонкие нити из него, содержащие большое число дефектов кристаллической структуры, можно запрессовать в бронзовую матрицу.

При последующей термической обработке композиции олово из бронзы начинает диффундировать в ниобий и в ходе реакции образует на его поверхности пленку  $Nb_3Sn$ . Таким способом удается изготавливать проводники с огромным количеством проволок, каждая из которых имеет толщину всего лишь в несколько миллионных долей метра. Проводники эти пластичны, они легко гнутся, но пленки  $Nb_3Sn$  остаются целыми.

Промышленность успешно освоила эту сложную технологию (таким же способом создаются композиты и других соединений, например  $V_3Ga$ ) и приступила к выпуску интерметаллических сверхпроводников. Опробованные в сверхпроводящих магнитных системах, они оправдали возлагавшиеся на них надежды. Так, один из композитных проводов на основе ниобий — олово с площадью сечения, равной  $2 \times 27 \text{ мм}^2$ , и числом нитей более 150 тысяч сохранял сверхпроводящее состояние даже при таких нагрузках, как ток силой 7,1 кА и магнитное поле индукцией 11 Тл. Результаты испытаний показали, что такой провод пригоден для создания достаточно крупных магнитных систем.

Работы по совершенствованию подобных материалов продолжают.



# НА ПУТИ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Тайна — это всего лишь задача,  
которую нужно решить.

*Вильям Крукс*

Не правда ли, странное сочетание слов: «высокотемпературная сверхпроводимость»? Казалось, мы уже выяснили, почему сверхпроводимость наблюдается только при очень низких температурах, и можно было сделать вывод, что проблемы высокотемпературной сверхпроводимости попросту не существует. Но не будем торопиться с таким выводом. Ведь больше всего внедрению сверхпроводников мешает необходимость их глубокого охлаждения и поддержания низких температур. Это сегодня вполне доступно, но дорого. Если бы удалось создать вещество, сверхпроводящее при комнатной температуре или хотя бы при температуре жидкого азота (77 К), то это явилось бы поистине огромным достижением. Тогда сверхпроводимость стала бы, так сказать, бесплатной и наступило бы «царство сверхпроводников».

«Размышления относительно использования таких сверхпроводников будут читаться скорее как научно-фантастический роман, чем серьезные научные предложения...» Эти слова принадлежат американскому физик У. Литглу, и взяты они из его статьи о проблемах высокотемпературной сверхпроводимости, написанной еще в середине 60-х годов.

Именно в те годы физики оживленно обсуждали вопрос о возможности существования высокотемпературной сверхпроводимости. Но тогда это были лишь смелые гипотезы отдельных ученых. Сегодня высокотемпературная сверхпроводимость — предмет целенаправленного поиска довольно широкого круга исследователей.

## НА ЧЕМ ОСНОВАНЫ НАДЕЖДЫ

Существуют два направления поисков веществ с высокими критическими температурами. Первое из них основано на использовании возможностей обычного механизма сверхпроводимости, второе связано с поиском новых высокотемпературных механизмов сверхпроводимости.

Надо сказать, что состояние теории сверхпроводимости, несмотря на ее огромные успехи, еще не такое, чтобы она могла предсказывать, при какой температуре перейдут в сверхпроводящее состояние более или менее сложные соединения. Поэтому и рекомендации, которые можно было сделать в

отношении поиска высокотемпературных сверхпроводников, носят качественный и не слишком четкий характер.

Тем не менее на основе представлений существующей теории и в рамках известного нам механизма спаривания электронов имеется возможность рассчитать максимально допустимые для этого механизма критические температуры. Как уже отмечалось, максимальная критическая температура не может быть больше 30..40 К. Но это «не закрывает» возможности появления больших значений критической температуры.

Теория позволила лишь выразить характеристики сверхпроводящего состояния через параметры кристаллической решетки проводника, в частности через энергию ее колебаний. Поскольку в реальном кристалле эта энергия не может быть сколь угодно большой, то не удивительно, что для всех испытанных до сих пор металлов и сплавов сверхпроводимость наблюдалась в очень узком интервале температур примерно до 20 К. Малость критической температуры оказывается, таким образом, связана с особенностями кристаллической решетки. Если изменить структуру решетки так, чтобы электроны сильнее связывались друг с другом, то можно повысить критическую температуру и с помощью обычного механизма. В этом направлении работают многие лаборатории мира, есть немалые успехи.

Однако, когда речь идет о высокотемпературной сверхпроводимости, о сверхпроводниках, которые существовали бы при комнатной температуре, мнение ученых таково: если высокотемпературная сверхпроводимость и возможна, то иной природы, чем в металлах и сплавах. Здесь может помочь только поиск новых механизмов сверхпроводимости.

Когда электроны спариваются, им нужен посредник. Во всех известных сверхпроводниках такую роль выполняет кристаллическая решетка. Возникает вопрос, а нельзя ли найти другого посредника, другую среду, которая обеспечивала бы более сильное межэлектронное притяжение.

Четкий и окончательный ответ на этот вопрос еще не получен. Но если говорить о теории, то можно указать даже несколько механизмов, не связанных с колебаниями кристаллической решетки. Один из этих механизмов, представляющий несомненный интерес, можно назвать *электронным* или, точнее, *экситонным*. Сам термин *экситонный механизм* сверхпроводимости принадлежит В. Л. Гинзбургу, внесшему большой вклад в разработку проблемы высокотемпературной сверхпроводимости.

Идея здесь такова. В кристаллах могут происходить процессы, в которых на сравнительно короткое время, помимо фононов, появляются и иные частицы. Вот мы говорили, что в диэлектриках при возбуждении электроны из заполненной (валентной) зоны перебрасываются в зону проводимости и становятся свободными. Однако возможно и другое течение процесса, когда возбужденный электрон не разрывает связи с дыркой, возникшей в заполненной зоне, а образует с ней единую связанную систему наподобие атома водорода. Такая система была впервые рассмотрена советским физиком Я. И. Френкелем и названа им *экситоном*.

Экситон можно рассматривать, как *единую частицу*. Обмен экситонами, так же как и обмен фононами, может приводить к притяжению между элект-

ронами. Однако максимальная энергия экситонов (точнее, отвечающая ей температура,  $E_{\text{экс}} = k\Theta$ ) может доходить до десятков тысяч градусов.

Расчет здесь простой. Энергия связи электрона и дырки равна как минимум ширине запрещенной зоны — энергетической щели между заполненной и свободной зонами диэлектрика. Эта ширина для диэлектриков достигает нескольких электрон-вольт. Поскольку 1 эВ равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж, а постоянная Больцмана  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, то легко подсчитать, что 1 эВ соответствует температуре, примерно равной  $10^4$  К. А теперь вспомним, что для металлов температура Дебая равна не более сотен градусов, так что при температуре, равной, допустим,  $10^4$  К, получим критическую тем-

пературу  $T_c \approx 10^4 e^{\frac{1}{g}} \approx 500$  К даже при постоянной  $g \approx 1/3$ . Сверхпроводимость при температуре 500 К!

Сразу же возникает вопрос: где и как искать экситонную сверхпроводимость? Надо, очевидно, создать благоприятные для ее появления условия. Предлагались различные варианты. Один из них, казалось бы самый простой, состоит в создании металла с подходящей электронной структурой. Согласно расчетам, проведенным советским физиком Б. Т. Гейликманом, взаимодействие между электронами, принадлежащими различным энергетическим зонам, может привести к образованию электронных пар.

Другое направление было предложено В. Л. Гинзбургом. Здесь речь идет об осуществлении сверхпроводимости на поверхности кристалла или в тонком металлическом слое с помощью вспомогательных покрытий.

При определенных условиях электроны в таком покрытии могут воздействовать на электроны в поверхностном слое металла, увеличивая их взаимное притяжение. Такой эффект может привести к заметному повышению критической температуры, когда покрытие наносится на тонкий металлический слой. Наиболее обещающей с этой точки зрения является слоистая структура типа «сэндвич», состоящая из тонкой металлической пленки и прилегающих к ней с обеих сторон слоев диэлектрика. В такой двумерной структуре из чередующихся слоев могла бы возникнуть высокотемпературная сверхпроводимость. Идея очень заманчивая, но, к сожалению, экспериментального подтверждения ее пока не получено. Здесь еще много неясного. Очень существен, например, выбор самого диэлектрика. Диэлектрик должен быть таким, чтобы в нем могли распространяться или хотя бы существовать подходящие экситоны, взаимодействующие с электронами в металле. Экситоны, надо сказать, частицы «капризные»: они существуют слишком короткое время (экситоны исчезают, когда электрон снова сливается с дыркой), возможно, электронное взаимодействие через экситоны слишком слабо. Ясно одно, что на экситонную сверхпроводимость трудно натолкнуться случайно, но ее можно искать и нужно искать.

Свой путь к высокотемпературной сверхпроводимости наметил американский физик Литтл, он предложил искать ее у полимеров особой структуры. Схематически модель органического сверхпроводника, рассматриваемая Литтлом, изображена на рисунке 47. Она состоит из длинной полимерной нити с ответвлениями по бокам. Основное в этой модели — су-



существование двух групп электронов: электроны проводимости движутся по проводящим полимерным нитям, а электроны-посредники располагаются в боковых ответвлениях. Когда электрон проводимости проходит около ответвления, создаваемое им электрическое поле наводит на короткое время положительный заряд на его конце, примыкающем к главной нити. Это сказывается на состоянии другого электрона проводимости: он притягивается к области положительного заряда и поэтому косвенно притягивается первым электроном.

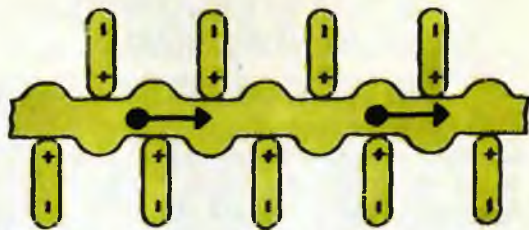


Рис. 47

Картина, как видите, вполне похожа на наблюдаемую в обычных сверхпроводниках. Между электронами возникает притяжение, имеющее ту же сущность, как при обмене фононами, только здесь их роль играют электроны боковых ветвей. Они и образуют дополнительную силу, создающую притяжение между электронами проводимости. При этом в главной — центральной нити возникает сверхпроводящее состояние, которое согласно расчетам, проведенным Литтлом, должно сохраняться до температуры  $T = 2400$  К!

Работа Литтла привлекла к себе большое внимание. Однако использованная им модель все же не приводит к сверхпроводимости. В основе своей она правильна, но реализация ее наталкивается на принципиальные трудности как теоретического, так и экспериментального характера. В модели Литтла существенное значение имеет лишь одно измерение полимерного проводника — его длины. Другие измерения пренебрежимо малы по сравнению с длиной. Такой проводник можно назвать одномерным. С теоретической точки зрения подозревают: электроны в одномерной проводящей нити будут вести себя совсем не так, как в трехмерном объеме металла.

Что касается экспериментальных трудностей, то главная из них заключается в том, что с отдельной полимерной нитью работать вообще невозможно. Можно, конечно, нарисовать на бумаге любую молекулу, но на практике мы имеем дело с веществом, состоящим из множества молекул с длинными нитями. Похожие на тонкие ветви с тяжелыми листьями, эти нити в образце полимера перепутались бы в беспорядке, а неизбежные разрывы из-за тепловых флуктуаций привели бы к разрушению сверхпроводимости.

С другой стороны, в модели Литтла привлекательна возможность обеспечить появление электронного механизма притяжения между электронами проводимости за счет боковых ветвей, структуру и свойства которых в известных пределах можно регулировать. Но это лишь общее направление поиска, когда предстояло найти конкретные сверхпроводниковые соединения. Было решено заняться синтезом и изучением таких органических соединений, в которых одномерный характер проводимости был бы обусловлен особенностями кристаллической структуры. По существу задача заключалась в том, чтобы получить кристаллы-аналоги полимерных молекул Литтла.

С другой стороны, в модели Литтла привлекательна возможность обеспечить появление электронного механизма притяжения между электронами проводимости за счет боковых ветвей, структуру и свойства которых в известных пределах можно регулировать. Но это лишь общее направление поиска, когда предстояло найти конкретные сверхпроводниковые соединения. Было решено заняться синтезом и изучением таких органических соединений, в которых одномерный характер проводимости был бы обусловлен особенностями кристаллической структуры. По существу задача заключалась в том, чтобы получить кристаллы-аналоги полимерных молекул Литтла.

## В ПОИСКАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

На первых порах внимание ученых привлекали некоторые соли сложного органического соединения, известного под названием тетрацианохинодиметан — сокращенно ТЦХМ. Молекулы ТЦХМ способны складываться в довольно прочные стопки, вдоль которых могут перемещаться электроны. Кристалл, составленный из таких стопок, как позвонок из отдельных позвонков, проводил бы ток только в одном направлении, вдоль стопок, а ведь как раз это и требуется. Поперек стопок ни о какой электропроводности не может быть и речи: слишком на большом расстоянии располагались они друг от друга, чтобы электроны могли перескакивать между ними.

Синтез столь сложных соединений и получение кристаллов из них — нелегкая проблема. Она была успешно решена. Но сверхпроводимости у синтезированных кристаллов не обнаружилось. Правда, вели себя эти новые вещества очень уж странно. Многими своими свойствами они напоминали металлы, кое в чем смахивали на полупроводники, а при понижении температуры и вовсе становились диэлектриками. Все это было неожиданно и требовало объяснения. Выяснилось, что металлическое состояние одномерных проводников, вообще говоря, очень неустойчиво. При понижении температуры оно может перейти в сверхпроводящее состояние, так что гипотеза Литтла внутренне непротиворечива. Но с меньшей, а возможно, даже с большей вероятностью такой металл при охлаждении способен стать диэлектриком. Все синтезированные соли сохраняли металлическое состояние лишь до температуры 60 К. Чуть дольше держится соль ТЦХМ с тетраиофульваленом (ТТФ) — до 40 К. Но при более низких температурах и она, вместо того чтобы стать сверхпроводником, переходит в непроводящее состояние.

Так ли неизбежен этот переход? Может, следовало бы перейти к «двухмерным» молекулам — сблизить стопки молекул, проводящие ток в продольном направлении, и облегчить перескоки электронов между соседними стопками? Сделать это можно, например, подвергая кристаллы большим давлениям в поперечном направлении или же делая попытки синтезировать новые органические кристаллы, в которых стопки молекул располагались бы сами по себе как можно ближе друг к другу. Словом, надо искать дальше, «конструируя» все более удачные кристаллы. Этим заняты сейчас ученые во многих лабораториях мира. И вот сравнительно недавно, в 1984 г., советским ученым удалось получить ряд кристаллов ионных солей сложного органического соединения тетрафульвалена, среди которых наконец оказались сверхпроводники. Правда, температура сверхпроводящего перехода лучшего из этих кристаллов всего лишь около 7 К. Цифра, конечно, мала, но обещает многое. Во всяком случае теоретический анализ не дает оснований отрицать возможность существования сверхпроводимости при температуре 300 К, т. е., как часто говорят, при комнатной температуре. Но, конечно, нужно пробовать, искать, проверять на сверхпроводимость все новые вещества.

Ищут сверхпроводимость и в неорганических соединениях, и в более сложных системах, в которых по крайней мере один из компонентов — металл. Уже много лет известно о сверхпроводимости некоторых полупроводников. Зафиксирован переход серы под высоким давлением в сверхпроводное металлическое состояние при температуре 26...31 К.

Еще в 1946 г. появилось сенсационное сообщение химика Р. Огга о сверхпроводимости при температуре 77 К в быстрозамороженных растворах натрия в аммиаке. Ток, введенный в кольцо из замороженного раствора, затухал в течение нескольких минут, что соответствовало сопротивлению кольца порядка  $10^{-13}$  Ом. И это в растворе, имевшем сопротивление в жидком состоянии порядка  $10^4$  Ом.

Опыты Огга привлекли к себе большое внимание исследователей. Но, как оказалось, образцы Огга были не сверхпроводниками, а проводниками, обладающими очень высокой, но все же не бесконечной электропроводностью. Сравнительно недавно сообщалось также об обнаружении явления сверхдиамагнетизма (выталкивания магнитного поля) в хлориде меди (CuCl), находящемся под высоким давлением, причем эффект наблюдался при температурах, достигающих 150...200 К. Сверхпроводники, как известно, являются идеальными диамагнетиками, но обратное утверждение может быть и несправедливо.

Здесь многое еще остается неясным. Возможность существования веществ, которые обладают сверхдиамагнетизмом, но отличны от обычных сверхпроводников, недостаточно еще изучена даже в теоретическом отношении. Не исключено, что сильный диамагнетизм в хлориде меди (CuCl) мог бы оказаться следствием появления высокотемпературной сверхпроводящей фазы. К тому же пример с хлоридом меди не единственный. Сильный диамагнетизм был обнаружен и в кристаллах сульфида кадмия: в жидком азоте CdS вдруг выталкивает магнитное поле, словно сверхпроводник.

Подобных примеров немало, и они множатся день за днем. Сверхпроводимость пытаются обнаружить даже у такого вещества, как водород. Твердый водород в обычных условиях является диэлектриком. Но при очень высоких давлениях, порядка 2,5 млн. атм, водород по расчетам должен перейти в металлическое состояние. Есть все основания ожидать, что металлический водород будет сверхпроводником, причем высокотемпературным, с температурой перехода порядка 100...300 К.

Возможно, что и сверхпроводимость не уникальное явление, а распространенное свойство. Более полувека, например, известна гипотеза Ф. Лондона о сверхпроводящем механизме памяти. Нейроны с миллиардами нервных волокон... Они чем-то напоминают длинные полимерные нити, предложенные Литтлом. Может быть, это и есть тот самый сверхпроводник, который так тщетно ищут физики. Недавно, например, появилась идея о бесконечной электропроводности родопсина — белка, обеспечивающего зрительный процесс. Разработана теория о существовании так называемых л-электронов. Это коллективизированные электроны, не связанные с каким-либо определенным атомом, способные перемещаться внутри сложных ор-

ганических молекул. Есть основания считать, что в системе  $\pi$ -электронов температура перехода могла бы быть выше, чем у металлов. И разумеется, это обстоятельство по-прежнему не находится в противоречии с доводами, с помощью которых объясняется отсутствие высокотемпературной сверхпроводимости среди металлов. Этот вывод просто следует из рассмотрения более широкого класса веществ.

Принесет ли успех исследование веществ, синтезированных из органического сырья? Или же проблема высокотемпературной сверхпроводимости будет решена каким-либо иным путем?

Этим вопросом мы и решили завершить наш рассказ о поисках и надеждах на пути к высокотемпературной сверхпроводимости. Мы говорили о заманчивой цели, которая пока не достигнута. Но произошло неожиданное. Когда эта книга готовилась к печати, пришло сообщение об открытии высокотемпературной сверхпроводимости.

## НОВЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Итак, открытие свершилось: получены не только сверхпроводники, полностью теряющие сопротивление при температуре жидкого азота (77,4 К), но имеются сообщения о переходах, начинающихся при температуре 230... 250 К и даже при комнатной температуре (рис. 48). Несомненно, произошло выдающееся событие, и честь открытия здесь принадлежит сразу многим.

Начало, видимо, положила работа американского ученого Слейта. В 1974 г. им были открыты новые сверхпроводящие материалы, названные латинской аббревиатурой ВРВ. Их состав — барий, свинец, висмут, кислород:  $\text{BaPb}_1 - x\text{Bi}_x\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 0,3$ ). Система, содержащая кислород, сразу же привлекла внимание физиков: при  $x=0,25$  в ней была достигнута температура сверхпроводящего перехода 13 К — наибольшая среди веществ, не содержащих атомов переходных и редкоземельных элементов. Кроме того, измерения, выполненные в 1980 г., показали, что максимальная концентрация электронов в этом веществе в сотни раз меньше, чем в обычных металлах. Исследованиями оксида ВРВ занимались во многих лабораториях мира, в том числе и в нашей стране; при этом было обнаружено много интересных эффектов, однако повысить критическую температуру так и не удалось.

И вот в конце 1986 г. швейцарским физикам Беднорцу и Мюллеру удалось найти удачную замену ВРВ-элементам. Были получены сверхпроводящие керамические оксидные образцы, содержащие лантан, барий, медь, кислород с температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_k = 35$  К. Вскоре, в начале 1987 г., пришли сообщения из США, Японии, Китая о сверхпроводящем переходе  $T_k = 102$  К. Иттриевые керамики полностью лорода, при температурах 40...50 К. Аналогичные результаты по лантан-стронциевой и лантан-бариевой керамикам были получены в феврале 1987 г. в ряде институтов и вузов нашей страны. Необходимо упомянуть также работу японских физиков по сверхпроводимости пленок, имевших крити-

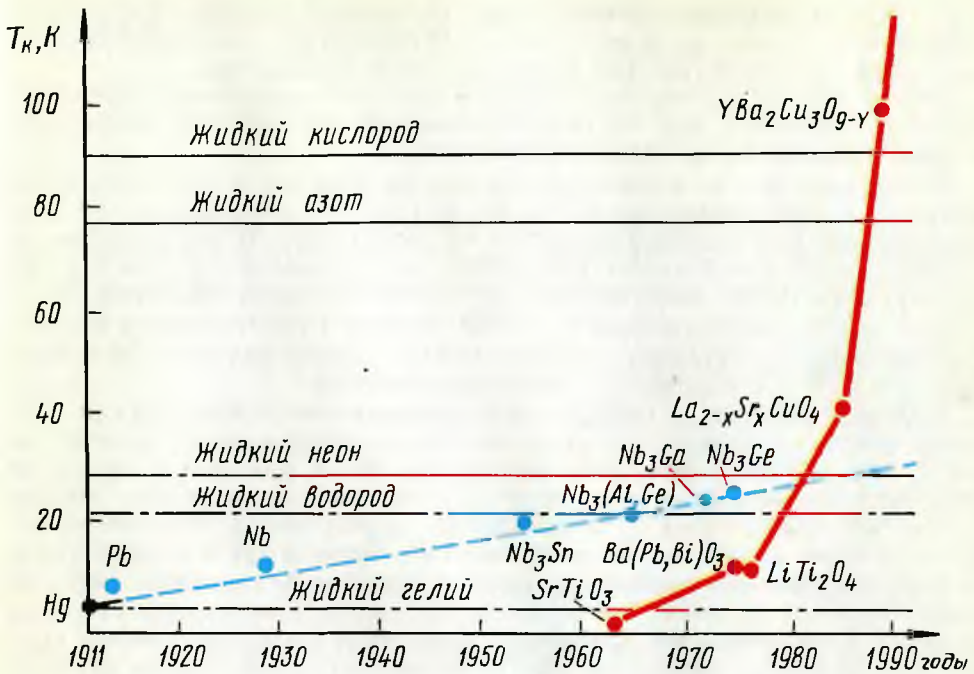


Рис. 48

ческую температуру  $T_k$  до 44,5 К. А совсем недавно, в марте—апреле 1987 г., в США и у нас в стране в Физическом институте АН СССР на образцах керамики (иттрий, барий, медь, кислород) была достигнута температура сверхпроводящего перехода  $T_k = 102$  К. Иттриевые керамики полностью теряли сопротивление электрическому току при температуре, превышающей температуру жидкого азота, так что азот теперь мог использоваться в качестве хладагента.

Началось интенсивное исследование свойств новых материалов. В США, Японии, у нас в стране были обнаружены неустойчивые фазы керамических материалов, в которых наблюдались переходы при температуре 250 К и даже при комнатной температуре. Решающим аргументом в пользу сверхпроводимости этих материалов было наблюдение их диамагнетизма. Однако образцы с такими переходами нестабильны. С течением времени они меняют свои свойства и переходы исчезают. Ближайшей задачей является выяснение природы таких переходов и выделение сверхпроводящей фазы.

Хотя структура новых соединений отличается от структуры уже известных ВРВ, но имеется одна очень важная общая черта: кристаллическая решетка тех и других соединений содержит кислородные «пирамиды» — октаэдры, в центре которых находятся теперь не атомы свинца или висмута, а атомы меди. Концентрация электронов в новых соединениях пока точно

не известна, но косвенные данные говорят об увеличении плотности состояний электронов в 2 раза по сравнению с ВРВ (плотность состояний пропорциональна корню кубическому из концентрации электронов).

В то же время известно, что электронно-фононная связь пропорциональна плотности состояний, так что резкое увеличение критической температуры в новых соединениях не кажется удивительным.

И еще одно весьма важное обстоятельство. Как оказалось, столь губительный для сверхпроводимости переход металл — полупроводник при данных составах этих соединений вообще не наблюдался. И это несмотря на сильнейшее электрон-фононное взаимодействие. По-видимому, все дело в том, что структура новых сверхпроводников состоит из смещенных относительно друг друга слоев структуры типа ВРВ. А такое строение отнюдь не благоприятствует структурному переходу металл — полупроводник, характерному для ВРВ и подавляющему сверхпроводимость.

Работы, связанные с новыми сверхпроводниками, сейчас ведутся широким фронтом. Физики ставят эксперименты. Обсуждаются модели на основе как обычного фононного механизма, так и различных вариантов нефонного механизма, которые могли бы объяснить наблюдаемые высокие критические температуры, а также описать другие факты. Уже сейчас существует более десяти систем, полностью сверхпроводящих в жидком азоте, но даже в найденных материалах из-за стремительного развития событий практически еще не проведена оптимизация условий приготовления состава примесей. Несомненно, что критические параметры и в первую очередь критические токи будут увеличены. Проблема все еще остается чисто научной. Чтобы придать ей технический характер — создать технологический сверхпроводящий материал, требуется еще немало работы. Многое предстоит изучить и создать, но прорыв в недоступную до сих пор для сверхпроводимости область азотных температур уже состоялся, и похоже, что самые фантастические проекты использования сверхпроводников могут стать реальностью при жизни нашего поколения.

# ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

---

## ПРОФЕССИИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

---

Истинная и законченная цель всех наук состоит в том, чтобы наделять жизнь человеческую новыми изобретениями и богатствами.

*Ф. Бекон*

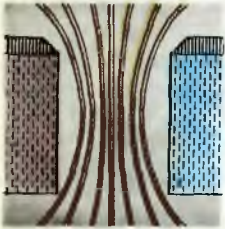
- СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ
- СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ В ФИЗИКЕ
- СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ЭНЕРГЕТИКА
- УСТРОЙСТВА НЕОБЫЧНЫЕ И ДАЖЕ «НЕ ОСУЩЕСТВИМЫЕ»
- МАГНИТОПЛАНЫ И МАГНИТОХОДЫ
- СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
- ЭВМ НА СВЕРХПРОВОДНИКАХ





Со времен открытия сверхпроводимости обсуждаются возможности технического использования этого поразительного явления. Непонятная сверхпроводимость не давала покоя и физикам, и инженерам. Хотелось как можно быстрее убедиться в том, что она может дать практические плоды. Но прошло почти полвека, прежде чем сверхпроводимость начала выходить из стен лабораторий на дорогу практического применения. Этому способствовали несколько обстоятельств. Здесь и развитие техники низких температур, и появление теоретических работ, объяснивших природу сверхпроводящего состояния, и открытие новых квантовых эффектов, и, конечно, создание сверхпроводящих материалов с высокими критическими параметрами.

Успехи экспериментального и теоретического исследований дали реальную возможность приступить к работам по освоению этого замечательного физического явления. Сверхпроводимость начала как бы вторую жизнь, но теперь уже не в качестве любопытного лабораторного феномена, а как явление, открывающее перед наукой и техникой весьма серьезные перспективы.



## ГЛАВА 9

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ

Применение сверхпроводников в конструировании магнитов наиболее близко природе сверхпроводимости.

*В. Буккель*

Важнейшая область техники, где применение сверхпроводников обещает произвести крупные изменения, определилась уже в первые годы после открытия этого явления — это передача электрического тока и создание сильных магнитных полей.

Можно назвать сотни разнообразных физических, технических и чисто инженерных задач, которые объединяются общим требованием: для их осуществления нужны сильные магнитные поля. Речь идет об энергетике, создающей новые генераторы, и о водолазных работах по подъему затонувших судов, и о физике, занятой проблемами термоядерного синтеза и ускорением заряженных частиц до сверхвысоких энергий... Все это области, где требуются легкие, мощные и экономичные магниты. Но вот ключа к проблеме создания нужных магнитов ученые долгое время не могли найти.

## КЛЮЧ К МАГНИТУ

Казалось бы, что тут сложного? Достаточно пустить сильный ток по виткам соленоида, и он станет мощным магнитом. С тех пор как Ампер выяснил, что соленоид ведет себя так же, как и природный магнит, все современные магниты изготавливаются по этому принципу. В каждом из них есть спираль — обмотка, по которой проходит ток. Чем больше сила тока, тем сильнее магнитное поле.

Электромагниты теоретически не имеют предела по своей «силе» или интенсивности (индукции магнитного поля). Но это только теоретически. Когда же с помощью тока создают магнитное поле, имеют место два побочных эффекта, которые и определяют сложности получения больших полей. Во-первых, на элемент провода длиной  $\Delta l$  и с током  $I$ , находящимся в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$ , действует сила  $F = BI\Delta l \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между вектором индукции  $\vec{B}$  и направлением тока. Следовательно, на провод с током будут действовать силы, пропорциональные силе тока и индукции поля, создаваемого соленоидом. Эти силы увеличиваются с увеличением поля и стремятся разорвать соленоид и, кроме того, прижимают крайние витки к средним. В мощных магнитах давление поля на внутренние секции столь велико, что материал обмотки начинает течь. Во-вторых, при протекании тока  $I$  по проводнику с сопротивлением  $R$  выделяется мощность  $P = I^2 R$ . Эта мощность пропорциональна квадрату силы тока  $I^2$ , и, следовательно, она будет увеличиваться с увеличением индукции создаваемого поля. Значит, если усилить магнитное поле, например, в 10 раз, то необходимо увеличить мощность в 100 раз... Расширение объема рабочего пространства также будет сопровождаться увеличением выделяющейся мощности. Отсюда получается, что для питания одного мощного магнита требуется целая электростанция, а для охлаждения — водокачка.

## КАК ПОЛУЧАЮТ СИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Итак, основные проблемы, стоящие на пути получения сильных магнитных полей, — это проблема потребляемой мощности (а значит, и теплоотвода) и проблема прочности. Как же решаются эти проблемы?

Сейчас трудно представить, насколько сложной была задача создания мощных магнитов. Что могли физики противопоставить природе? Только очень точный учет «за» и «против» — оптимальную конструкцию и полное использование природных свойств материалов.

Так появились магниты нового типа. Они не поражали размерами, однако с их помощью можно было получать поля индукцией до 30...40 Тл.

В основе все тот же соленоид Ампера. Но по конструкции современные соленоиды мало чем напоминают традиционные катушки с током. Вместо обычного, круглого в сечении провода медная лента (шина) или набор штампованных медных дисков с отверстиями для охлаждающей жидкости. Сам же соленоид помещают в прочную наружную оболочку, которая

и воспринимает разрывающие усилия, действующие со стороны магнитного поля.

Это последнее обстоятельство чрезвычайно существенно. Чтобы оценить силу, создаваемую магнитным полем, достаточно привести такой пример. В поле, индукция которого 100 Тл, магнитные усилия эквивалентны тем усилиям, которые развиваются в жерле пушки при выстреле! Попробуйте удержать такое поле! Естественно, магнит надо усиливать, делать обмотку из медных сплавов повышенной прочности. Правда, сопротивление этих сплавов в 1,5...2 раза больше, чем сопротивление меди, а это усложняет и без того непростую проблему теплоотвода.

Охлаждение магнита — одна из важнейших проблем. Чтобы соленоид не нагревался, его надо постоянно охлаждать, иначе магнит сгорит. Так, в магните, индукция которого 10 Тл, расходуется мощность порядка 1,5 МВт. Вся эта мощность выделяется в виде теплоты, и, чтобы отвести ее от соленоида, приходится прокачивать через него сотни литров воды в минуту, вся эта вода выходит нагретой почти до кипения. Поток воды не должен ни на минуту ослабевать, иначе вода закипит, теплопровод ухудшится и магнит выйдет из строя.

А можно решить вопрос по-другому. Охлаждать обмотки с помощью, например, криогенных жидкостей — сжиженных газов. В охлаждаемых жидкими газами соленоидах тепло отводится не за счет нагрева воды, протекающей по соленоиду, а за счет испарения сжиженных газов. При этом медный соленоид, охлаждаемый жидким азотом или жидким водородом, уменьшает свое сопротивление в 8 и 100 раз; во столько же раз уменьшается и отводимая мощность.

Но у криогенных соленоидов есть важный недостаток — большой расход сравнительно дорогого хладагента. Теплота парообразования сжиженных газов во много раз меньше, чем теплоемкость воды (при нагреве ее от 10 до 90 °С), и для отвода одного и того же количества теплоты необходимо гораздо больше жидкого газа, чем воды. Ясно, что стоит это недешево. Поэтому криогенные соленоиды широкого распространения не получили, тем более что у них появились еще более холодные конкуренты.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СОЛЕНОИДЫ

Обмотку соленоида можно сделать и из сверхпроводящего материала. Такой соленоид может работать, почти не потребляя электроэнергии, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает. Нужно только поддерживать соленоид при низкой температуре, а для этого требуются очень малые мощности. Таким образом, эксплуатация сверхпроводящих магнитов исключает потребность в больших источниках питания. Для питания годятся обычные батареи, генераторы или аккумуляторы.

Решается проблема теплоотвода. При нулевом сопротивлении равна нулю и выделяемая мощность. Правда, проблема прочности остается, поэтому рекордных полей сверхпроводящие соленоиды не создают. Но зато

они легче и меньше по размерам, чем обычные водоохлаждаемые. По сравнению с криогенными сверхпроводящие соленоиды требуют в сотни раз меньшего расхода хладагента. Так, при индукции магнитного поля 10...15 Тл сверхпроводящий магнит весит всего несколько десятков килограммов, со всем относящимся к нему оборудованием занимает площадь несколько квадратных метров и расходует примерно 10 л жидкого гелия в сутки. И это вместо нескольких десятков тонн и тысяч киловатт электроэнергии, которые потребовались бы для работы несверхпроводящего магнита с теми же параметрами. Особенно наглядно проявляются достоинства сверхпроводящих магнитов, когда нужно получить сильное магнитное поле в большом объеме.

Идея использования явления сверхпроводимости для создания сильных магнитных полей возникла сразу же после его открытия. Уже в 1913 г. Камерлинг-Оннес решает построить сверхпроводящий магнит индукцией, равной 10 Тл, не потребляющий энергии. Но мечте Оннеса не суждено было сбыться, по крайней мере при его жизни. Сверхпроводимость, как выяснилось, разрушалась в магнитных полях, в тысячи раз более слабых. Поскольку такие поля (индукцией в сотые доли тесла) можно было гораздо проще получать с помощью постоянных магнитов, реализацией идеи создания сверхпроводящих магнитов никто тогда серьезно не занялся. Так прошло почти двадцать лет.

Надежды на постройку мощных сверхпроводящих магнитов возродились в начале 30-х годов, когда голландские физики Хаас и Воогд обнаружили, что сплавы свинца с висмутом сохраняют сверхпроводимость вплоть до полей с индукцией 2 Тл. Это открытие давало возможность строить сверхпроводящие магниты по крайней мере с таким же магнитным полем. Однако их так никто и не стал строить.

В истории сверхпроводящих магнитов произошло весьма драматическое событие. Преемник Оннеса, новый директор лейденской лаборатории, известный физик Кеезом решил повторить эксперимент. Он измерил критический ток сплава свинца с висмутом и нашел, что ток этот слишком мал, чтобы из этого сплава имело смысл делать проволоку для обмотки магнита. К несчастью, авторитет Кеезома в научном мире был слишком высок. Физики, узнав о его результатах, оставили надежды построить сверхпроводящие магниты и занялись другими делами.

В начале 60-х годов нашего столетия измерения на сплавах свинца с висмутом были повторены. И тогда выяснилось, что Кеезом ошибся: он сделал то, чего не имел право делать, — экстраполировал данные, полученные им в слабых магнитных полях, на область сильных магнитных полей. Критический ток оказался вполне достаточным для того, чтобы из этих сплавов все же можно было изготовить пусть не очень сильные, но довольно экономичные магниты. Широко развернувшиеся вслед за этим поиски новых сверхпроводников привели к открытию сплавов и соединений с высокими критическими параметрами. Теперь можно было приступать к созданию проволоки, кабелей, шин из сверхпроводящих материалов. Путь к технической сверхпроводимости, к сверхпроводящим магнитам, электротехническим устройствам был открыт.

## СВЕРХМАГНИТЫ: ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Постройка сверхпроводящих магнитов — далеко не простое дело. Казалось бы, что тут сложного; требуется только намотать из сверхпроводящей проволоки катушку, замкнуть ее концы и пустить по такому контуру достаточно сильный ток. Все очень просто! Но в действительности все гораздо сложнее.

Одной из серьезных и неожиданных трудностей, с которой пришлось встретиться проектировщикам и создателям сверхмагнитов, явилась так называемая проблема *деградации* проволоки в соленоидах. Обнаружилось, что значения критических токов, полученные на коротких образцах (кусочках проволоки), не воспроизводятся на длинных отрезках. В результате соленоиды, рассчитанные на одно магнитное поле, дают в действительности другое, более слабое. Уже при токах почти в 2 раза меньше ожидаемых критических значений начинаются нестабильности (скачки), которые могут привести к разогреву, а затем и к преждевременному переходу некоторых участков проволоки в нормальное состояние. И сразу согласно закону Джоуля—Ленца теплота будет выделяться пропорционально квадрату силы тока. Драматизм ситуации усугубляется тем, что мгновенно начинают нагреваться соседние участки проволоки, развертывается лавинный процесс исчезновения сверхпроводимости и нормальная зона распространяется по всей обмотке. При этом энергия, запасенная в магнитном поле, перейдет в теплоту, гелий начнет быстро испаряться, давление в криостате, где помещается соленоид, возрастет и может произойти взрыв. Как же быть?

Можно, конечно, работать и при небольших токах, а для достижения требуемых магнитных полей увеличить объем и массу катушки. На первых порах так и поступали. Но это экономически невыгодно. Так что пришлось искать новые пути решения проблемы. Было необходимо каким-то образом стабилизировать ток в обмотке сверхпроводящего соленоида.

Исследования показали, что основной причиной эффекта деградации является скачкообразное проникновение магнитного потока в сверхпроводник. При возрастании тока и поля в соленоиде целые связки вихревых нитей, закрепленные на дефектах или неоднородностях кристаллической решетки, срываются и под действием силы Лоренца начинают скачкообразно перемещаться по материалу. Срыв и перемещение вихревых нитей сопровождаются выделением тепла и повышением локальной температуры. Если это тепло отводится недостаточно быстро, то температура поднимается выше критической, возникает зародыш нормальной фазы, который в зависимости от размеров и теплоотдачи может привести к переходу всего соленоида в нормальное состояние.

*Стабилизируют* сверхпроводящее состояние соленоидов двумя способами: не допускают появления скачков потока, приводящих к возникновению нормальной фазы; создают условия, при которых нормальная фаза не распространялась бы по тонконусу элементу и не выводила весь соленоид из сверхпроводящего состояния. В первом случае говорят о *внутреннем* способе стабилизации материала, во втором — о *стационарном*.

Внутренне стабилизированные сверхпроводящие материалы состоят из тонких нитей сверхпроводника, окруженных нормальным металлом с высокой электро- и теплопроводностью, например медью или алюминием. При хорошем электрическом контакте сверхпроводника с нормальным покрытием (в случае перехода отдельных участков сверхпроводника в нормальное состояние) ток закорачивается через низкоомное покрытие. Стало быть, местные перегревы ограничиваются, а отвод тепла гелием с большой поверхности упрощается. При достаточной толщине нормального металла таким путем можно получить полностью стабилизированные проводники. Из них изготавливают сравнительно небольшие магнитные системы с запасенной в магнитном поле энергией, не превышающей нескольких сотен килоджоулей.

При создании крупных сверхпроводящих систем с энергией в десятки и сотни мегаджоулей используются сверхпроводящие материалы со стационарной стабилизацией. В этом случае сверхпроводник занимает небольшой процент площади сечения материала (от 5 до 15% в зависимости от величины системы), а остальное — стабилизирующий металл. Конструкция обмотки, используемой при этом, обеспечивает надежное охлаждение витков соленоида. А в ряде случаев, если применяется так называемое принудительное охлаждение магнитной системы, в теле самого проводника предусматриваются специальные каналы для гелия. Возникший в результате какого-либо возмущения участок нормальной фазы не распространяется на весь соленоид, так как окружающий нормальный металл способствует быстрому охлаждению нити и отводу тепла в гелий. В это же время нормальный металл воспринимает на себя большую часть тока, выходящего из нормального участка сверхпроводника. Этим он также обеспечивает условия охлаждения сверхпроводящей нити. Тепло быстро рассеется, и сверхпроводящее состояние восстановится.

Правда, на деле не так уж все и просто. На стабильность, как выяснилось, влияют не только свойства самих сверхпроводников, поэтому при использовании полностью стабилизированного материала могут возникать ситуации, при которых катушка перейдет в нормальное состояние. При этом магнитное поле исчезнет, а вся энергия, запасенная в магнитном поле, превратится в тепло. В больших соленоидах эта энергия может быть довольно значительной. В магнитном поле индукцией 5 Тл в объеме  $1 \text{ м}^3$  запасается энергии примерно  $10^7$  Дж. Если при переходе в нормальное состояние вся энергия бесконтрольно превратится в тепло, то это может привести к полному разрушению магнита.

Во избежание таких катастрофических последствий соленоиды, в особенности крупные, необходимо снабжать защитными устройствами для быстрого отвода запасенной энергии и автоматического отключения тока в сверхпроводящей цепи.

При проектировании соленоидов серьезную проблему представляют и большие силы, воздействующие на обмотки в сильных магнитных полях. Так, например, в магните, построенном для пузырьковой камеры Арагонской национальной лаборатории (США), при максимальном поле индукцией около 2 Тл и силе тока 2 кА между двумя секциями обмотки возни-

кают силы порядка  $450 \cdot 10^4 \text{Н}$ ! Чтобы избежать деформации или повреждения обмоток, приходится конструкцию усиливать: применять особо прочные распорки, прокладывать между витками эластичные прокладки, помещать обмотку в прочный наружный каркас из нержавеющей стали.

Вот видите, с какими трудностями пришлось встретиться создателям сверхпроводящих магнитов. Сильные магнитные поля сверхпроводимость добывала нелегким трудом. Множество проблем пришлось решать заново — создавать проводники, затем конструировать из них провода особой структуры и формы. И даже доставка тока от генератора в криостат с гелием превратилась в проблему, решить которую было непросто. Пришлось создавать такие устройства, которые генерировали бы большие токи не вне, а внутри криостата.

Сегодня мало кто сомневается в будущем сверхпроводящих магнитов. Пора «детских болезней» кончилась, и «наступление» идет полным ходом. Магнитные поля индукцией 10...15 Тл, создаваемые сверхпроводящими соленоидами в объемах до  $10 \text{ см}^3$ , стали доступны большинству физических лабораторий. Речь идет уже о крупных сверхпроводящих магнитных системах с рабочей зоной (диаметром), измеряемой метрами, и индукцией магнитного поля 5 Тл и больше. Сильные магнитные поля и притом в больших объемах целесообразно создавать только с помощью сверхпроводящих магнитов. Такие магниты чрезвычайно необходимы современной физике и технике.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ  
МАГНИТЫ В ФИЗИКЕ

Техника давно познала высокую цену науки и ее влиянию обязана своим современным блестящим развитием.

*Н. Е. Жуковский*

Физические профессии сверхпроводящих магнитов весьма разнообразны. Магнитные поля применяются практически во всех областях физики. С их помощью физики изучают свойства вещества и испытывают новые материалы, сортируют изотопы атомов и определяют их основные характеристики, фокусируют пучки заряженных частиц и удерживают внутри ускорителя сотни миллиардов ядерных снарядов, скорость которых достигает скорости света.

Использование магнитных систем для исследований в физике высоких энергий — одно из важнейших и интересных направлений в современной прикладной сверхпроводимости. Это магнитные системы ускорителей, каналов транспортировки и сепарации пучков, разнообразные детектирующие системы.

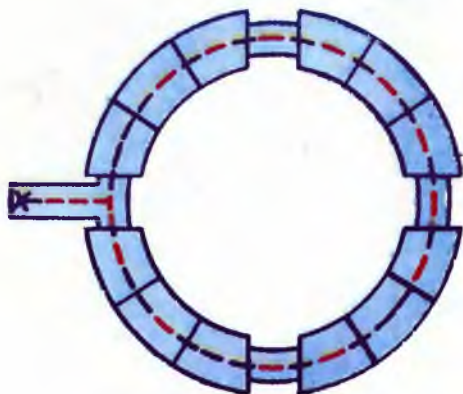


Рис. 49

Современные ускорители, сообщаящие частицам наиболее высокие энергии (десятки, сотни гигаэлектрон-вольт), имеют вид больших колец. Их так и называют — *кольцевые ускорители*. Магнитная система таких ускорителей обычно состоит из нескольких отдельных секторных магнитов, составляющих в плане кольцо. Между «челюстями» магнита тянется вакуумная камера (рис. 49). Частицы, которые должны ускоряться такими машинами, ионизируются и ускоряются до энергий в десятки тысяч электрон-вольт. Затем они инжектируются в кольцевую камеру и вращаются внутри ее, приобретая после каждого оборота дополнительную энергию.

Современные кольцевые ускорители — необычайно сложные и до-



рогостоящие технические сооружения. Так, крупнейший в нашей стране протонный ускоритель в г. Серпухове имеет диаметр кольца около 0,5 км, а длина его составляет 1,5 км. Протоны, мчащиеся в его кольцевой камере, заключенной в броню из 120 массивных магнитных блоков массой около 20 000 т, набирают 76 ГэВ энергии. Еще внушительнее размеры ускорителя в Батавии (США). Гигантское сооружение, сообщаемое протонам энергию около 500 ГэВ, имеет диаметр кольца 2 км! Его постройка обошлась государству в 250 млн. долларов, причем расходы на магнитную систему составили добрую половину стоимости всего ускорителя.

Но даже такой уникальный инструмент уже не удовлетворяет физиков. Проектируются новые сверхмощные установки на энергии частиц до нескольких триллионов электрон-вольт. Что же будет с размерами, массами, «прожорливостью» мощных магнитов? Ведь ясно, что и без того громадные цифры все будут расти и расти.

Сверхпроводящие магниты разрешили бы сразу множество проблем. Замена обычных магнитов компактными — сверхпроводящими магнитами, почти не потребляющими мощности, — это возможность сильного увеличения магнитного поля, а стало быть, и уменьшения размеров ускорителя.

Мы знаем, что магнитное поле действует на заряженные частицы силой Лоренца. Она направлена перпендикулярно скорости частицы и искривляет ее траекторию. Чем больше индукция магнитного поля, тем меньше радиус окружности, по которой движется частица в магнитном поле. Если удастся достичь магнитного поля индукцией, скажем, 10 Тл, то размеры ускорителя уменьшатся почти в 5 раз. И наоборот, при том же радиусе ускорителя увеличение индукции магнитного поля до 10 Тл позволит примерно во столько же раз увеличить энергию ускоряемых частиц. Значительно сокращаются и расходы на постройку магнитной системы ускорителя. Поэтому уже сегодня большие кольцевые ускорители проектируются с таким расчетом, чтобы при необходимости можно было обычные магниты заменить сверхпроводящими. В качестве примера можно привести установку «Гиперон-1», предназначенную для исследования частиц с малым временем жизни. В рабочей области сверхмагнита диаметром 1 м индукция магнитного поля достигает 5 Тл. Обмотка магнита массой 8 т изготовлена из сплава ниобий—титан; его криогенная установка потребляет лишь сотую часть энергии, которую расходовал бы аналогичный магнит в обычном исполнении.

Сильные магнитные поля, создаваемые сверхмагнитами, нужны и для управления пучками частиц на выходе из ускорителя. Выведенные частицы нужно «проводить» к тому месту, где они ударяются о поставленную на их пути мишень. Сталкиваясь с ядрами атомов мишени, высокоэнергичные «атомные снаряды» порождают ливни осколков (вторичные частицы), природу которых надо расшифровать, определить их электрический заряд и импульс. Эти операции производятся в детекторе с помощью магнитного поля, а поскольку частицы чрезвычайно энергичны, то для управления их движением нужны сильные магнитные поля. И здесь сверхпроводящие магниты оказались очень удобными.

Первые сверхпроводящие соленоиды как раз и использовались физиками для камер, где искривляемые магнитными полями траектории пролетаю-

щих частиц определялись пузырьками вскипающей жидкости. По кривизне траекторий (физики назвали их треками) можно определить как знак заряда частицы, так и ее импульс.

Сверхпроводящие камеры уже эксплуатируются. Так, в жидководородной пузырьковой камере Европейского центра ядерных исследований в Женеве используется сверхпроводящая магнитная система. Она состоит из двух соленоидов, каждый из которых набран из 20 плоских секций — блинов, а каждый блин имеет внутренний диаметр 4,7 м, длину 1,5 м и располагается на расстоянии 1 м от соседнего блина. Соленоиды питаются током силой 5,7 кА, при этом магнитное поле в зазоре имеет индукцию 3,5 Тл. Другой сверхпроводящий магнит диаметром 3,7 м и длиной 2,5 м, установленный на пузырьковой камере Арагонской национальной лаборатории, создает магнитное поле индукцией до 2 Тл.

Применение сверхпроводников обычно оправдано лишь для создания очень сильных магнитных полей. Но иногда приходится строить и относительно небольшие магниты, особенно когда нужны поля изощренной формы, поля недостаточной силы в объеме со сложной геометрией, поля, нарастающие или спадающие во времени с заранее оговоренными скоростями, — разнообразен спектр возможностей, предоставляемых сверхмагнитами.

Специалисты считают, что в ближайшие годы магнитные системы будут внедрены и в индустриальные процессы, в такие перспективные отрасли народного хозяйства, как горное дело, металлургия, добыча топлива. Уже проектируются опытные промышленные установки на сверхпроводниках для обогащения бедных руд, фильтрации загрязненной воды, ускорения химических реакций в металлургических процессах.

Особо следует сказать о применении сверхпроводящих магнитов в приборах, использующих явление ядерного магнитного резонанса, сокращенно ЯМР. С их помощью можно, например, определить структуру вещества.

Известно, что частицы, входящие в состав атомных ядер, — протоны, нейтроны — обладают хотя и незначительными, но весьма определенными магнитными моментами. Ядра атомов, как мы уже говорили, подобны маленьким магнетикам. В обычных условиях ядерный магнетизм вследствие малости магнитных моментов ядер наблюдать очень трудно. Тем не менее существуют так называемые резонансные методы, которые позволяют не только наблюдать явления, связанные с ядерным магнетизмом, но и вооружать современные физические, химические, биологические лаборатории мощными средствами исследования вещества. С помощью сильных магнитных полей удается расшифровать структуру сложных органических молекул. Ведь ориентации ядер почти всех атомов зависит от силы и направления магнитного поля. Если создать еще одно поле, переменное во времени, то ядра атомов при определенной частоте колебаний будут вращаться. Зная частоту колебаний поля и энергию излучаемых квантов, можно определить структуру атомных групп.

Специфика применения сверхпроводящих магнитов для исследований с помощью ЯМР состоит в том, что необходимо иметь в пространстве чрезвычайно однородное поле. Техника ЯМР требует индукций магнитного

поля от 1 до 10 Тл с высокой однородностью. С помощью обычных магнитов можно было добиться такой однородности в полях с индукцией 2 Тл, и то только за счет сложных и дорогих источников питания. У сверхпроводящих магнитов есть качество, позволяющее получить высокую однородность в полях, значительно превышающих индукцию, равную 2 Тл, фактически без затрат энергии. Таким качеством является способность сверхпроводящих магнитов работать в режиме замороженного поля. Это означает, что в сверхпроводящей цепи существует не меняющийся во времени электрический ток.

Сверхмагниты, создающие в малых объемах сильное и очень однородное поле, необходимы и физикам, изучающим твердое тело. Сильное магнитное поле резко заворачивает траектории электронов, летящих в толще образца. Измерение частоты колебаний этого движения позволяет определить такие важные характеристические параметры электронной системы, как эффективная масса электронов, длина свободного пробега между двумя соударениями, концентрация частиц.

В относительно слабых полях круговые траектории, которые описывают электроны под действием силы Лоренца, очень велики, и такие исследования можно проводить лишь на очень чистых образцах с большой длиной свободного пробега. В сильных полях, создаваемых сверхмагнитами, радиус круговых орбит уменьшается и появляется возможность исследовать вещества с меньшей длиной свободного пробега. Становится также возможным сознательно вводить центры рассеяния электронов и изучать влияние этих центров на электронную систему. В решении этих проблем сверхпроводящие магниты незаменимы и сейчас широко используются в физических лабораториях. Маленькие сверхсильные соленоиды в комплекте с системой охлаждения стали уже промышленной продукцией, выпуск которой все более расширяется.



# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ЭНЕРГЕТИКА

---

Всякая последовательно развивающаяся наука только потому и растет, что она нужна человеческому обществу.

*С. И. Вавилов*

На протяжении всей своей истории человечество вынуждено беспокоиться об увеличении производства энергии. И это естественно. Чем более развитым становится человеческое общество, тем все больше его потребность в энергии.

Сегодня среди всех известных видов энергии первое место в различных областях народного хозяйства и быта бесспорно занимает электрическая энергия.

В экономически развитых странах производство электроэнергии удваивается каждые десять лет. Такие темпы развития энергетики должны в будущем привести к поистине грандиозным результатам. Сохранятся ли они, если пользоваться только нынешними электрическими машинами и линиями электропередач?

В настоящее время большая часть электрической энергии вырабатывается на тепловых электростанциях. Четыре из каждых пяти киловатт электроэнергии, произведенных сегодня, получаются в принципе тем же способом, которым пользовался наш предок для обогрева помещения, т. е. сжиганием топлива, использованием запасенной в нем химической энергии, преобразованием ее в электрическую. Топливо сжигается, вода в котлах превращается в пар и направляется в турбины, которые приводят в действие генераторы, вырабатывающие электрический ток. Конечно, способы сжигания топлива стали намного совершеннее, но до сих пор большая часть энергии, запасенной в топливе, безвозвратно теряется, не совершая никакой полезной работы.

Можно быть уверенным, что в конечном счете все сложности — и научные, и инженерные — усилиями десятков тысяч специалистов будут преодолены. Потoki энергии, рожденные на электростанциях, будут непрерывно нарастать. Но преодолеть главное препятствие — ограниченность запасов топлива (нефти, газа) — не сможет никто.

Вот почему сегодня приходится очень интенсивно искать новые источники энергии, а также разрабатывать новые технические средства ее преобразования. На самых разных путях ищут ответ на этот вопрос многие ученые и инженеры.

## ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Одной из наиболее острых и важных проблем, решаемых сегодня наукой, является проблема осуществления управляемой термоядерной реакции. Есть веские основания полагать, что успешное решение этой проблемы, которая сулит человечеству неисчерпаемые источники энергии, возможно при использовании мощных магнитов.

Принцип действия термоядерного реактора, над созданием которого работают крупнейшие физики многих стран мира, имеет много общего с принципом действия обычного атомного реактора. В обоих случаях основой являются ядерные реакции. Масса вещества перед ядерной реакцией несколько больше массы продуктов после реакции. В результате огромное энерговыделение.

Отличие заключается в том, что термоядерная реакция есть реакция соединения (синтеза) легких ядер в более тяжелые, а не их деления. Одной из наиболее выгодных в этом отношении реакций является синтез ядер гелия из ядер дейтерия — тяжелого водорода. Из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить такую же энергию, как при сгорании 350 л бензина!

Теоретически схема высвобождения термоядерной энергии совершенно ясна. Да и практически ядерный синтез осуществлен в земных условиях — при взрыве водородных бомб. Но реакция, которая протекает в водородной бомбе, неуправляема; надо научиться ее регулировать, заставить протекать спокойно. В этом и заключается вся трудность. Чтобы осуществить управляемый термоядерный синтез, нужно «всего лишь» разогнать ядра легких атомов до таких скоростей, чтобы при столкновениях они не разлетались. Для этого вещество должно иметь очень высокую температуру, измеряемую многими десятками миллионов градусов.

При такой высокой температуре любое вещество пребывает в так называемом плазменном состоянии. Атомы теряют свои электронные оболочки, и вещество превращается в бурлящую смесь положительно заряженных ядер и электронов. Такую горячую плазму невозможно удержать ни в одном сосуде.

Однако поскольку речь идет о заряженных частицах, то на их траектории можно воздействовать магнитными полями. Тогда при достаточно сильных магнитных полях и их соответствующей геометрии можно, несмотря на высокие скорости частиц, удержать их в некотором реакционном пространстве (камере). Необходимые для этого магнитные поля столь велики, что безусловно их создание экономически оправдано только при использовании сверхпроводящих магнитов.

Уже сейчас обсуждаются технические, экономические и даже экологические показатели будущих термоядерных реакторов различных типов. Наибольшего развития достигли установки типа «Токамак». Они представляются и наиболее перспективными на ближайшие годы. Именно на этих установках, широко развивающихся в нашей стране, удалось объединить высокую температуру плазмы (до 80 млн. градусов), ее высокую плот-

ность (до  $10^{15}$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ ) и значительное время удержания (до 0,1 с). Получение на них экспериментальные результаты позволяют достаточно надежно рассчитывать параметры установки вплоть до промышленного термоядерного реактора.

«Токамак» внешне и по принципу действия похож на большой трансформатор (рис. 49). К его первичной обмотке подводится электропитание из сети. Вторичной обмоткой служит замкнутая тороидальная вакуумная камера, заполняемая водородом или его тяжелыми изотопами. При пропускании через первичную обмотку переменного тока в камере возникает вихревое поле, которое ионизирует рабочий газ. Наведенный в этом газе, как в проводнике, сильный ток (сотни тысяч ампер) образует плазму и нагревает ее до высоких температур. Сильное магнитное поле вторичного тока и продольное поле, созданное специальной катушкой, удерживает плазменный шнур, не дает ему рассыпаться и упасть на стенки камеры.

Сложность заключается в том, что энергия, необходимая для питания магнитной системы установки, будет превышать выходную мощность термоядерного реактора; в лучшем случае для запуска системы потребуется специальная мощная электростанция. Единственный выход — использование сверхпроводящих магнитов. Только в этом случае полезная мощность реактора будет больше мощности, потребляемой магнитной системой.

Сегодня мало кто сомневается в том, что термоядерный реактор будущего может работать лишь со сверхпроводящей магнитной системой. Такая система уже проверена в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова на установке «Токамак-7».

Сейчас на установке «Токамак-7» ведутся плазменные эксперименты и тщательнейшим образом изучается поведение сверхпроводящей системы, на долю которой приходится нелегкая работа. Ведь всего в нескольких сантиметрах от сверхпроводящей обмотки, охлажденной чуть ли не до абсолютного нуля, бушует термоядерное пламя с температурой в миллионы градусов. Кроме того, на сверхпроводящие катушки с током действуют гигантские электромагнитные силы. Малейшая разбалансировка этих сил, их отклонение от расчетных значений могут привести к перемещению токонесущих сверхпроводников в солениоде и затем к местному перегреву и потере сверхпроводимости. А за этим может последовать разрушение магнитной системы и всей установки. Уже одно это показывает, сколь совершенны должны быть сами сверхпроводящие солениоиды, а также системы их питания, контроля и защиты. И сколь важен для разработчиков будущих термоядерных реакторов опыт создания и эксплуатации «Токамака-7».

Накопленный опыт уже позволил советским ученым и конструкторам разработать самую крупную в мире сверхпроводящую систему, в магнитном поле которой будет накапливаться энергия более 600 МДж! Такая магнитная система предназначена для физической демонстрации термоядерной реакции на установке «Токамак-15», сооружаемой в Институте атомной энергии.

А впереди основная цель — первый энергетический термоядерный реактор — электростанция.

## МГД-ЭНЕРГЕТИКА

Термоядерный реактор еще не работает, но проведенные исследования и разработки стимулировали развитие нового способа производства энергии с помощью магнитогаидродинамических генераторов (МГД-генераторов).

МГД-генератор предназначен для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Принцип его работы состоит в следующем. Известно, что при движении в магнитном поле в проводнике возбуждается электродвижущая сила — ЭДС. Если концы проводника замкнуть на какую-либо нагрузку, то в цепи пойдет ток. Именно на этом принципе электромагнитной индукции, открытом Фарадеем более 150 лет назад, и работают все генераторы электрического тока, преобразующие механическую энергию движения в электрическую.

В обычном генераторе ротор вращается, магнитный поток пересекает обмотку и в ней возбуждается электрический ток. В МГД-генераторе нет вращающихся частей. Проводником, пересекающим магнитное поле, является низкотемпературная плазма — газ, нагретый до температуры  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$  и содержащий добавки легкоионизирующихся веществ (для повышения электропроводности). Когда такой газ с достаточно большой скоростью проходит в специальном канале через сильное магнитное поле, возникает ЭДС. Если электроды, соответствующим образом расположенные вдоль плазменного канала, соединить с нагрузкой, то ЭДС создаст ток в направлении, перпендикулярном движению газа и силовым линиям магнитного поля, способный совершать работу (рис. 50).

В МГД-генераторе движение газа осуществляется за счет собственного

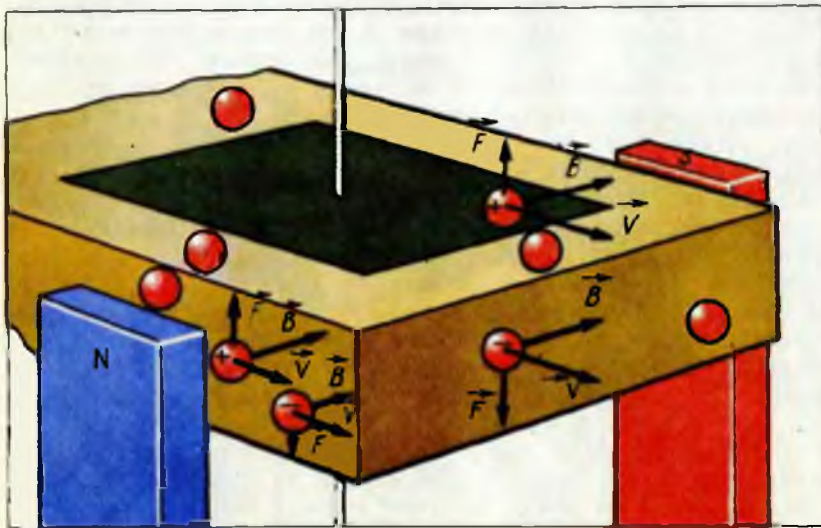


Рис. 50

расширения, т. е. без применения какого-либо двигателя. В канале МГД-генератора вообще нет движущихся частей, и поэтому материал, из которого сделаны наиболее ответственные элементы, не испытывает скольконибудь значительных механических усилий. В этом состоит одно из важных преимуществ преобразования энергии с помощью МГД-генератора.

Перед разработчиками этих генераторов стоит та же нелегкая проблема, что и перед создателями термоядерного реактора: как получить сильные магнитные поля? Постоянные и очень сильные магнитные поля нужны для того, чтобы за малое время пролета частиц по каналу успеть «прибить» их к тому или иному электроду.

В МГД-электростанциях будущего, так же как и в термоядерных реакторах, необходимо использовать сверхпроводящие магнитные системы. В противном случае большая часть энергии будет уходить на собственные нужды МГД-генератора.

Магнитная система для наиболее распространенного типа МГД-генератора, так называемого линейного генератора, подобна отклоняющему магниту, используемому в ускорительной технике. Но размеры магнитной системы крупной МГД-электростанции должны быть значительно больше, чем магнитных систем, создаваемых для любых иных целей. Так, у МГД-генератора мощностью порядка 500 МВт сечение канала, в котором создается магнитное поле, будет составлять несколько квадратных метров при длине более 10 м. Запасенная в магнитном поле энергия может превышать  $10^{10}$  Дж.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В энергетике нет еще термоядерных реакторов и МГД-генераторов, хотя целесообразность их создания очевидна. А вот как скажется использование сверхпроводников в машинах, которые уже сегодня обеспечивают нас практически всей электроэнергией, в частности в турбогенераторах — самых мощных электрических машинах нашего века?

Современные электрогенераторы — крупные сооружения, в которых создаются большие магнитные поля, и с каждым годом их мощность возрастает. Это отнюдь не гигантомания, а веление времени. К сожалению, возможности повышения мощности электрических машин безграничны. И вот здесь сверхпроводники могут оказать энергетике большую услугу. Если бы обмотку возбуждения электрической машины (по сути дела, электромагнит особой формы) удалось сделать из сверхпроводника, это сразу бы решило ряд проблем. Во-первых, исчезло бы нагревание. Во-вторых, возросли бы в машине поля и токи, что привело бы к резкому сокращению размеров машины. Так, сверхпроводящий генератор мощностью 1300 МВт имел бы около 10 м в длину и массу 280 т. Длина аналогичной машины обычной конструкции более 20 м, масса 700 т. Одна только масса ротора, например, уменьшилась бы в 4...5 раз. А ведь металл, из которого изготовлен крупный быстровращающийся ротор, работает в очень напряженных усло-



виях, так что снижение массы и размеров существенно повышает механическую надежность конструкции. Можно указать и на ряд определенных экономических преимуществ: КПД сверхпроводящих машин будет выше, чем у самых совершенных генераторов традиционной конструкции.

Преимущества сверхпроводящих машин становятся особенно заметными при мощности генератора более 1000 МВт. Сверхпроводники снимают с повестки дня проблему «лимита мощности», давая фантастическую возможность лостройки генераторов мощностью вплоть до 20 000 МВт, в то время как для обычных конструкций этот предел примерно в 10 раз ниже.

Работы, связанные с созданием мощных и экономичных генераторов, ведутся сейчас широким фронтом. Создаются модели, рассчитываются ожидаемые параметры сверхпроводящих машин, их стоимость и характерные режимы. У нас в стране первая экспериментальная модель сверхпроводникового генератора была построена еще в 1967 г. Она имела мощность всего лишь 600 Вт. А в 1982 г. был испытан генератор мощностью уже 20 МВт. Результаты этих испытаний позволили приступить к постройке сверхпроводников генератора мощностью 300 МВт. Этими работами открывается новая страница в развитии отечественной энергетики. Можно полагать, что 90-е годы станут временем внедрения сверхгенераторов в широком масштабе.

## СКЛАДЫ ЭНЕРГИИ

Обратимся теперь к реальным заботам энергетиков. Электроэнергию выгодно производить непрерывно. Однако спрос на нее в разное время суток, в разные дни недели колеблется. Эта неравномерность особенно остро ощущается при пиковых нагрузках, когда спрос на энергию намного превышает ее предложение. На производстве, чтобы преодолеть подобный разрыв, пользуются складами.

Есть склады и у энергетиков. Причем хранить энергию вовсе обязательно в форме электроэнергии. Накапливать ее можно с помощью топливных элементов, вращающихся маховиков, водохранилищ, способных приводить в движение турбины гидростанций, и т. п.

Но накапливать энергию можно и с помощью сверхпроводников. Сверхпроводящие индуктивные накопители электромагнитной энергии представляют собой пример одного из уникальных технических применений явления сверхпроводимости. Это соленоиды, специально предназначенные для накопления и выдачи токов по требованию. Плотность энергии, запасенной в магнитном поле накопителя, на два порядка больше, чем в емкостном накопителе (конденсаторной батарее), а отдаваемые импульсные мощности могут достигать величин в десятки миллионов киловатт. Время вывода энергии из сверхпроводящего накопителя в зависимости от конструкции и запасенной энергии — от тысячных долей секунды до часов.

Конструктивно сверхпроводящий накопитель выглядит как большая

замкнутая сама на себя катушка, в которой без потерь циркулирует ток. Такие катушки с огромными токами можно выполнить в виде тороидальных обмоток диаметром несколько метров. Вот один из проектов накопителя энергии на 28 тыс. МВт. Это гигантский криостат, похожий на бублик диаметром с футбольное поле — около 100 м. По виткам обмотки катушки течет ток силой более 150 кА — настоящая электрическая река. Электромагнитные силы, действующие на обмотку, огромны — тысячи ньютонов на 1 см<sup>2</sup>. Чтобы обеспечить прочность конструкции, одного стального бандажа мало; предполагается разместить ее под землей в прочных скальных породах, которые должны воспринимать нагрузки, лежащие на бандаж. Это позволит снизить стоимость сооружения самих накопителей. Кроме того, магнитное поле, распределенное в толще скалы, не будет влиять на наземный транспорт и электрооборудование.

Пока что созданы лишь модельные системы. Например, накопитель «СПИН-2» при запасенной энергии приблизительно 1,5 МДж, силе тока около 10 кА, напряжении вывода около 50 кВ и времени вывода энергии 0,005 с обеспечивает мощность примерно 500 тыс. кВт. Сейчас разрабатываются более крупные накопители.

Мощные сверхпроводящие накопители весьма перспективны не только для питания импульсных нагрузок, но и для регулирования производства и потребления электроэнергии в целых энергосистемах. Они могут изменить энергетику, сделать потребителей более независимыми от источников тока, упростить управление, контроль и защиту оборудования.

## КАБЕЛИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

С ростом потребляемых мощностей все острее становится проблема передачи энергии. Источники энергии и ее потребители часто разделены огромными расстояниями. Как лучше передавать энергию?

Сегодня электроэнергия передается потребителям в основном посредством воздушных линий передачи (ЛЭП). Для повышения эффективности работы таких линий есть единственный путь — дальнейший подъем напряжения. Уже строятся ЛЭП напряжением 1 МВ и выше, КПД таких линий около 95%.

Воздушные линии самые дешевые, но с ними связано множество проблем. В них бьют молнии, они мешают строительству, транспорту, радиосвязи, портят ландшафт, вредят фауне и человеку. Можно, конечно, передавать энергию по подземным кабелям, но и здесь возникает немало сложностей. Приходится укладывать несколько параллельных ветвей кабеля, принудительно охлаждать токонесущие жилы кабеля газом, маслом или водой. Иногда для отвода тепла орошают почву вдоль трассы. Кабельная линия передачи примерно в 10...15 раз дороже воздушной при одинаковой пропускной способности. И в воздушной, и в кабельной линии приблизительно десятая часть энергии безвозвратно теряется при нагреве токоведущих жил.

Конечно же, очень заманчиво для решения этой проблемы использовать явление сверхпроводимости. Проводник без сопротивления идеально подходит именно для этой цели. По мнению многих ведущих специалистов, будущее ЛЭП связано с подземными сверхпроводящими кабелями. Первые шаги в этом направлении были сделаны еще в 60-х годах. Уже тогда американец Р. Мак-фи подсчитал, что по сверхпроводящему кабелю толщиной в руку можно пропускать всю пиковую мощность, вырабатываемую электростанциями США.

Идея создания сверхпроводящих кабелей укреплялась в острой научной борьбе. Необходимо было решить, будет ли применение сверхпроводников экономически конкурентоспособно в каком-либо интервале напряжений. Не превысят ли затраты на низкотемпературное обеспечение экономию за счет уменьшения потерь энергии? Выполненный советскими инженерами технико-экономический анализ показал, что при большой мощности сверхпроводящий кабель будет в 2...3 раза дешевле обычного, а потери энергии в нем будут сокращены примерно в 25 раз. Сам по себе сверхпроводящий материал намного дороже меди, однако токонесущая жила оказывается дешевле. Причина ясна: ведь по проводу площадью сечения  $1 \text{ мм}^2$  можно пропускать не 1...2 А, а 10 кА. Сэкономленную на токовой жиле сумму можно потратить на криогенное охлаждение.

Здесь надо отметить, что в кабелях переменного тока некоторая часть энергии все же теряется. Дело в том, что при протекании переменного тока в сверхпроводящем кабеле появляется электрическое сопротивление. Обусловлено оно воздействием переменного электрического поля на неспаренные электроны в сверхпроводнике. В течение одного полупериода тока их скорость нарастает от нуля до максимума и вновь падает до нуля, а затем ток меняет направление на противоположное, и все повторяется снова.

Таким образом, идущий по сверхпроводнику ток расходует свою энергию на колебательные движения электронов. Возникающее сопротивление, хотя оно и мало по сравнению с сопротивлением металла в нормальном состоянии, все же приводит к выделению тепла, и кабель надо охлаждать.

Конечно, с точки зрения потерь в проводнике идеально было бы передавать энергию при постоянном токе. Но для этого необходимо иметь по меньшей мере два преобразователя тока: один на передающем конце линии для превращения переменного тока, вырабатываемого электростанцией, в постоянный и другой на принимающем конце линии для преобразования постоянного тока в переменный промышленной частоты. Хотя в преобразовательной технике за последнее время достигнуты большие успехи (на место вакуумных устройств пришли полупроводниковые), тем не менее стоимость преобразователей остается высокой. В дальнейшем, очевидно, сверхпроводящие ЛЭП на постоянном токе будут использоваться для передачи мощности порядка гигаватт на расстояния не менее нескольких сотен километров.

Основная трудность, которая возникает при прокладке сверхпроводящего кабеля, — тепловая защита сверхпроводника. Предохранить кабель от большого притока тепла извне можно с помощью вакуумной изоляции. Кабель имеет вид многослойной трубы и, в сущности, представляет собой длинный

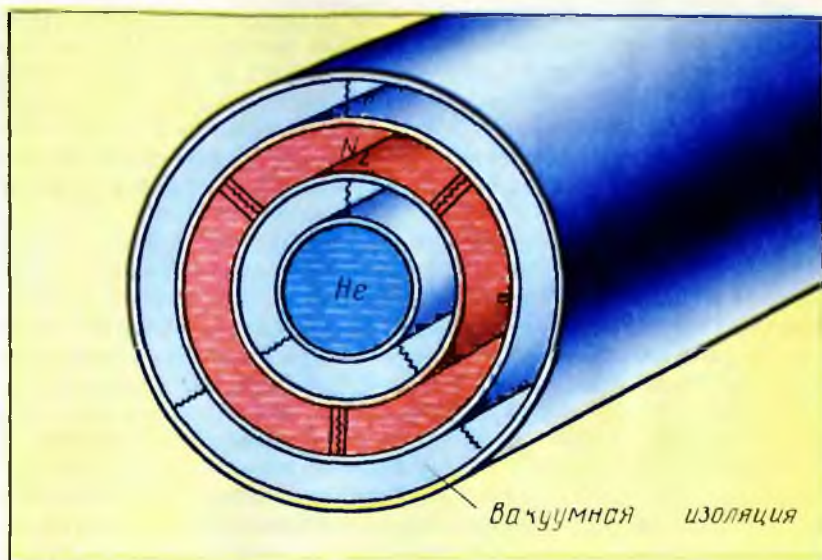


Рис. 51

криостат. Поперечное сечение такого кабеля схематично показано на рисунке 51. Внутренняя труба диаметром около 70 мм, покрытая слоем сверхпроводящего материала толщиной около 0,3 мм, заполнена жидким гелием, который гонят по ней насосы. В качестве сверхпроводника может быть использован, например, сплав ниобия, титана и циркония. Между первой и второй трубами вакуумная изоляция, между второй и третьей течет жидкий азот, между третьей и четвертой (наружной) опять вакуумная изоляция.

Несмотря на простоту конструкции, монтаж такой линии сопряжен со значительными трудностями. Надо обеспечить герметичность кабеля, научиться собирать его из отдельных коротких отрезков, разработать рефрижераторы, концевые устройства, компенсаторы деформаций и другое оборудование. «Холодные» линии должны выдерживать перегрузки и аварийные режимы, поэтому важно совершенствовать и стабилизацию линий.

Проблем много. Чтобы создать сверхпроводящую ЛЭП, нужно преодолеть еще много технических трудностей. Но, во всяком случае, подобная система перспективна, и над ней надо работать.

Сейчас опытные сверхпроводящие кабели проектируются и строятся во многих странах мира. У нас в стране, например, создан и испытан отрезок кабеля длиной 50 м из  $Nb_3Sn$ , рассчитанный на силу тока 8 кА и напряжение 10 кВт, т. е. на мощность, равную примерно 0,8 ГВт. Подобные кабели мощностью до 5 ГВт испытываются в США и Японии. Словом, идут испытания, ведется сравнение результатов, отрабатываются проблемы охлаждения, теплоизоляции, надежности, решаются инженерные задачи.

## РАЗМЫШЛЕНИЯ ОБ ЭКОЛОГИИ

Вот мы говорили, что сверхпроводники могли бы качественно изменить электротехнику, повысить эффективность электроэнергетики. Это так. Но это лишь одна сторона дела — техническая. Сверхпроводники могли бы оказать большую помощь и при решении другой чрезвычайно важной и сложной проблемы нынешнего и будущего столетий. Речь идет об экологической проблеме — проблеме загрязнения атмосферы нашей планеты.

По имеющимся оценкам, ежегодно в атмосферу Земли в результате сжигания природного топлива выбрасывается около 150 млн.т золы, 100 млн.т оксидов серы, 60 млн.т оксидов азота, 300 млн.т оксида углерода. Существенная часть этих загрязняющих атмосферу веществ (многие из которых могут существовать там довольно длительное время) приходится на долю тепловых электростанций, где сжигается огромное количество органического топлива.

Но это еще не все. Увеличение до грандиозных размеров производства энергии за счет использования природного топлива может привести в конечном счете к повышению средней температуры земного шара, а следовательно, и атмосферы. Возникает новая проблема — тепловое загрязнение атмосферы, т. е., попросту говоря, ее нагревание. Это обусловлено тем, что поверхность Земли должна излучать в мировое пространство энергию, полученную не только от Солнца, но и от дополнительных источников. Хотим мы этого или нет, почти вся произведенная человеком энергия в конечном счете превращается в тепло. Сегодня в электрическом балансе Земли энергия, произведенная человеком, составляет около 0,01%. Многие специалисты считают, что увеличение этой цифры до 1%, т. е. в 100 раз, может привести к повышению температуры Земли на 1 °С. Даже такие небольшие изменения температуры могут привести к весьма нежелательным последствиям. Из-за потепления, например, смогут частично растаять льды океанов, а также ледники. В результате уровень воды в Мировом океане может существенно повыситься, что станет причиной затопления (возможно, катастрофического) части суши.

Как стабилизировать тепловой баланс планеты? Одни ученые предлагают затормозить, пока не поздно, рост промышленности. Другие предлагают регулировать тепловой режим планеты техническими средствами. Уже известны проекты устройства энергетических туннелей через атмосферу для вывода избыточного тепла в космос. Проектов много, но сам вопрос изучен еще недостаточно полно. Необходимы дальнейшие исследования в этой области.

Что касается сверхпроводниковой энергетики, то она, конечно, не решает проблемы теплового загрязнения планеты, но может ее смягчить. Отсутствие электрического сопротивления дало бы не только колоссальный экономический эффект, но и позволило бы значительно снизить потери тепловой энергии без какого-либо ущерба для энергоемкости промышленных объектов.



### УСТРОЙСТВА НЕОБЫЧНЫЕ И ДАЖЕ «НЕ ОСУЩЕСТВИМЫЕ»

Я видел озеро, стоящее отвесно.

*О. Мандельштам*

При покорении нового холодного мира сверхпроводников физикам и инженерам пришлось заново решать множество проблем, считавшихся решенными. И в этом нет ничего удивительного. Ведь на сверхпроводниках можно сделать все те же давно известные электромагниты, генераторы, двигатели, трансформаторы. Казалось, магнитные характеристики и принцип действия старых агрегатов должны сохраниться, изменившись только в сторону улучшения за счет устранения потерь энергии.

Однако сверхпроводники позволяют все же не только копировать давно известные конструкции, снижая их габариты, повышая мощность и экономичность. Особые свойства сверхпроводников, необычность их поведения послужили основой для появления принципиально новых и порой даже странных на первый взгляд решений. Вот некоторые из них.

#### МАГНИТНЫЙ НАСОС

В сверхпроводящих магнитах сила тока часто достигает нескольких тысяч ампер. Это колоссальное преимущество сверхпроводников обернулось для инженеров проблемой: ведь эти тысячи ампер нужно получить от генератора, работающего при комнатной температуре, а уж потом по проводам передать в криостат с жидким гелием, где помещается сверхпроводящий магнит. Сечение проводов, по которым передается ток (а они несверхпроводящие), должно по меньшей мере быть раз в 100 больше, чем сечение сверхпроводника. По такому большому сечению тепло из комнаты лавиной устремится в криостат — гелий мгновенно выкипит, а сверхпроводимость исчезнет.

Перед конструкторами встала задача: создать такие устройства, которые генерировали бы большие токи не вне, а внутри криостата. Это удалось сделать, используя различные особые свойства сверхпроводников, например их диамагнетизм.

На рисунке 52, а показан принцип действия устройства, позволяющего увеличить плотность магнитного потока путем его сжатия. Магнитное поле создается внутри полого сверхпроводящего цилиндра с двумя отверстиями — большим и маленьким. Если цилиндр поместить во внешнее магнитное поле,

то вокруг отверстий наведутся незатухающие токи. Они окружают часть поля, которая проникла в эти отверстия и оказалась сцепленной с цилиндром. Что бы теперь ни делать с магнитным полем, эти замороженные потоки не изменятся, пока цилиндр остается сверхпроводящим. Следовательно, если удастся вытеснить магнитный поток из большого отверстия и перевести его в малое, то мы получим возможность усилить поле настолько, насколько уменьшится площадь замороженного потока. Сделать это можно путем введения в большое отверстие сплошного сверхпроводящего стержня. Поскольку сверхпроводник является для силовых линий магнитного поля непреодолимой преградой, то они выталкиваются из большого отверстия в малое, создавая на этом участке более концентрированное поле.

А нельзя ли пойти дальше — сделать процесс сжатия повторяющимся? Идея заключается в следующем: путем многократного сжатия потока в ограниченном объеме (в нашем случае в отверстии цилиндра) создается сильное магнитное поле.

Возможный вариант такого магнитного насоса схематически изображен на рисунке 52,б. Работает это устройство следующим образом.

Охлаждая цилиндр во внешнем магнитном поле с индукцией  $B_0$ . Затем в малое отверстие вводится сверхпроводящий стержень, сечение которого немного меньше сечения отверстия. При этом магнитный поток вытесняется в кольцевой зазор, и там поле возрастает. Если в этот момент включить нагреватель  $W_2$ , то часть поверхности отверстий перейдет в нормальное состояние и оба отверстия окажутся соединенными. Магнитный поток как бы прорывается в большое отверстие, и там, выключив нагреватель, его можно заморозить.

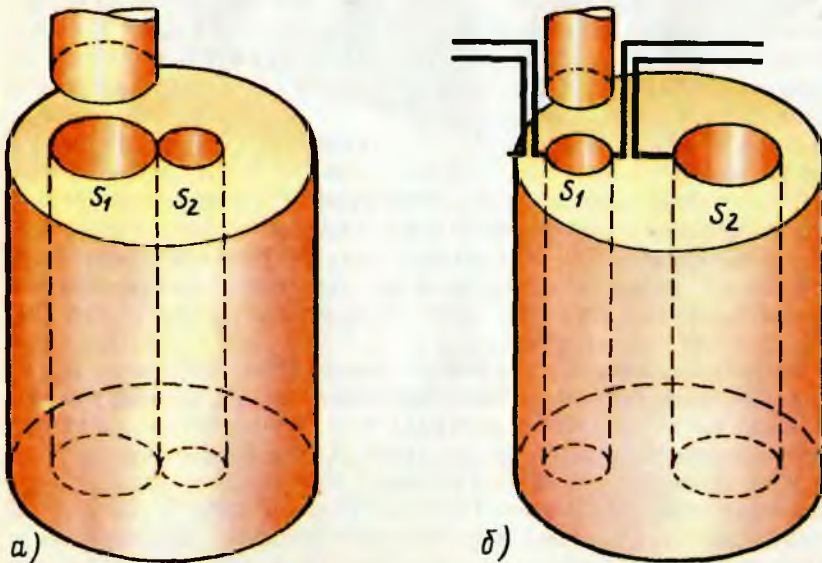


Рис. 52

Если теперь включить нагреватель  $W_1$  и извлечь поршень из малого отверстия, то в нем восстановится первоначальное магнитное поле с индукцией  $B_0$ .

Таким образом, нагревательные обмотки в цилиндре играют роль своего рода переключателя, с помощью которого устанавливается (или уничтожается) связь между отверстиями. Выключим нагреватель  $W_1$ , и поток опять окажется замороженным в малом объеме. Его можно снова сжать и вытолкнуть в большое отверстие. При многократном сжатии потока, если нагрев стенок чередуется по определенному плану, индукция магнитного поля возрастает до предельных значений. Этим методом удалось получить поля с индукциями более 2 Тл в объеме, равном нескольким кубическим сантиметрам.

## ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА БЕЗ ЩЕТОК

Физический принцип действия машины постоянного тока как генератора основан на явлении возникновения ЭДС индукции в рамке из проводника при вращении ее в магнитном поле (рис. 53,а).

Основными частями машины постоянного тока являются индуктор, с помощью которого создается магнитное поле, якорь, в обмотке которого наводится ЭДС индукции, коллектор и электрические щетки.

Коллектор — это изолированные друг от друга проводящие пластины, присоединенные к катушкам. По пластинам коллектора скользят щетки, соединяющие концы обмоток с внешней электрической цепью. Это самый капризный и ненадежный узел машины постоянного тока. Избавиться от скользящего токосъема — мечта инженеров-электромехаников. Каких только сочетаний якорей и индукторов не предлагалось, и все тщетно. Создать бесщеточный генератор казалось делом абсолютно нереальным. И все же такой генератор был создан — сверхпроводники помогли заменить щеточный токосъем. Вот как была решена эта проблема.

Представьте себе сверхпроводящую пластинку, например из свинца, включенную в замкнутый контур. С торцов пластинки к нагрузке — сверхпроводящей катушке — отходят провода, выполненные из сверхпроводников с высокими критическими параметрами (рис. 53,б). Под пластинкой движется магнит, поле которого как бы пронзает свинцовую пластинку, создавая в ней нормальную область — дырку, через которую проходит магнитный поток. Вся остальная часть пластинки по-прежнему остается в сверхпроводящем состоянии.

По мере движения магнита невидимая дырка будет скользить вдоль пластинки, а магнитные силовые линии вытягиваться. В момент выхода магнита из контура магнитный поток соединится со сверхпроводящей цепью, и в ней наведется незатухающий ток, который обеспечит сохранение магнитного поля. Так появится магнитный поток. Обратите внимание: магнит входит в цепь, нарушая ее сверхпроводимость лишь частично, а выходит из нее через другой участок, не разрушая сверхпроводящего состояния.

На этом принципе могут быть созданы устройства с вращающимся маг-



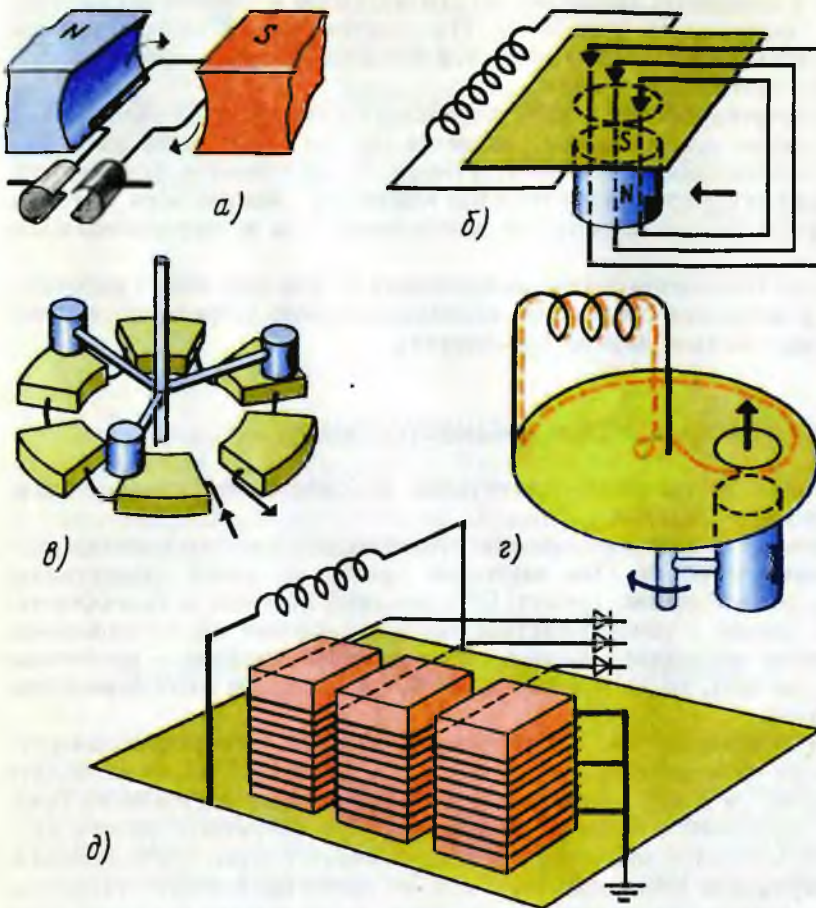


Рис. 53

нитом (рис. 53,в). Несколько возбуждающих магнитов вращаются над пластинами, соединенными последовательно с помощью сверхпроводников. Во время работы магнитные силовые линии возбуждающих магнитов отклоняются сверхпроводящими пластинами, но в местах, где находятся дырки, силовые линии легко проходят. Так как магниты вращаются, то и дырки, через которые проходят силовые линии, перемещаются по пластинам. Таким путем создается необходимое условие для возникновения тока — пересечение проводников силовыми линиями. В результате в генераторе возникает ток.

Такого же эффекта можно достичь, заменив пластину сплошным сверхпроводящим диском (рис. 53,г). Концы обмотки в этом случае подсоединяются к центру и к периферии диска, а полюс магнита движется под диском по окружности. Впрочем, магнит можно и не двигать, а просто располо-

жить в ряд над пластиной несколько электромагнитов и поочередно на каждый подавать напряжение (рис. 53,д). Получается тот же эффект, что и с перемещаемым магнитом, только движется не сам магнит, а магнитное поле, создаваемое магнитной системой.

Особенно примечательным в этих устройствах (электротехники называют их *топологическими генераторами*) является то, что постоянный ток в них снимается с неподвижной части конструкции. А ведь многие утверждали, что создать машину постоянного тока без коллектора невозможно. Сегодня такие генераторы уже используются для подачи тока в сверхпроводящие магниты.

Конечно, над топологическими генераторами нужно еще много работать, но сам факт реализации с помощью сверхпроводников устройства, считавшегося неосуществимым, весьма красноречив.

## ТРАНСФОРМАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Еще одна немыслимая конструкция на сверхпроводниках — *трансформатор постоянного тока*.

Трансформатор — одно из самых распространенных изделий электротехнической промышленности. Они настолько просты по своей конструкции, что улучшить их невероятно трудно. Сегодняшний прогресс в трансформаторостроении связан с усовершенствованием технологии их изготовления. Промышленность предлагает тысячи типов трансформаторов — различные по мощности, по весу, по количеству обмоток... Нет только трансформатора постоянного тока.

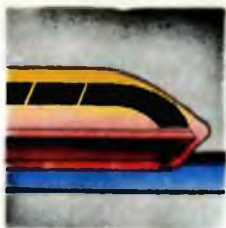
Получить постоянный ток во вторичной обмотке несверхпроводящего трансформатора действительно невозможно. В обычных условиях нельзя передать энергию от одной обмотки к другой с помощью постоянного тока, так как ток в первичной обмотке, а следовательно, и магнитный поток в магнитопроводе не меняются по величине и направлению. Только при включении, когда ток в первичной цепи нарастает, т. е. во время переходного процесса, во вторичной обмотке возникает импульс тока, но он быстро затухает из-за электрического сопротивления вторичной обмотки.

Если сделать обмотки трансформатора сверхпроводящими, первичную обмотку соединить через выключатель с источником тока вне криостата, а вторичную замкнуть на сверхпроводящую цепь, то описанный переходный процесс пойдет иначе. При подаче тока в первичную обмотку во вторичной обмотке наведется ЭДС, вызывающая ток, который не затухает даже тогда, когда уже нет вызвавшей его ЭДС, поскольку сопротивление сверхпроводника равно нулю. С помощью таких трансформаторов постоянного тока можно подавать в криостат с жидким гелием небольшой ток по тонким проводникам, трансформировать этот ток, доводя его силу до десятков тысяч ампер. И эти громадные токи будут циркулировать по сверхпроводящей обмотке, в то время как из области, имеющей комнатную температуру, трансформатору будет подаваться ток силой всего лишь в несколько ампер.

---

## МАГНИТОПЛАНЫ И МАГНИТОХОДЫ

---



Техника все в большей мере приобретает способность осуществлять человеческие намерения.

*Н. Винер*

Сверхпроводник, в толщу которого не проникает магнитное поле, всегда окружен «магнитной подушкой». Вспомните опыт с «парящим магнитом», о котором мы рассказывали в главе 2. Магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводник и создает таким образом «подушку», на которой покоится магнит. Это явление используется в настоящее время для создания опор без трения.

### МАГНИТНЫЕ ПОДВЕСЫ И ПОДШИПНИКИ

Сверхпроводящая сфера (рис. 54) висит над кольцом, в котором циркулирует незатухающий ток. Происходит это, как мы уже знаем, благодаря диамагнетизму сверхпроводников. Сила тяжести сферы уравновешивается «магнитной подушкой», создаваемой сверхпроводящим током. Парить таким образом, как выяснилось, могут довольно тяжелые предметы.

Согласитесь, здесь есть где разыграться фантазии — магнитная левитация.

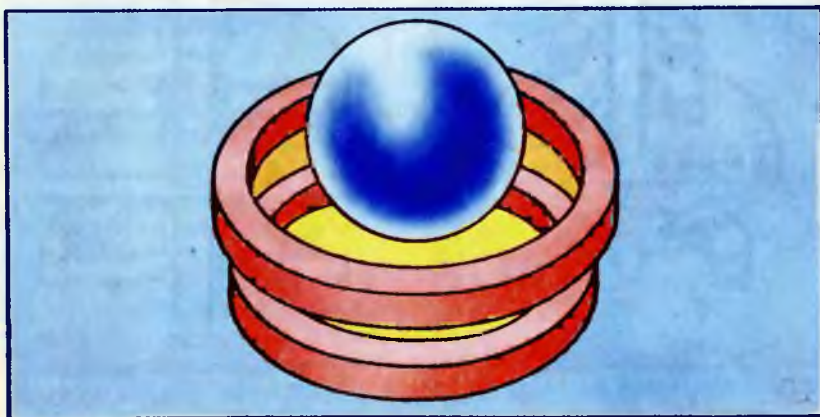


Рис. 54

тация. Эта тема дает такой простор для воображения, что мы могли бы долго заниматься обсуждением разных диковинных вещей, которые неожиданно окажутся весьма реальными. Описания «парящих тел» не сходят со страниц изданий, посвященных физике низких температур. Впрочем, не только этих...

Есть немало научно-фантастических романов, где фигурируют всякого рода экраны, через которые не чувствуется тяготения, экраны, уничтожающие трение и др. Вы, наверное, помните и знаменитый летающий остров, который увидел в одном из своих путешествий Гулливер — «сначала хирург, а затем капитан нескольких кораблей». В толще острова на алмазных опорах был установлен магнит, который, отталкиваясь от некой субстанции, находящейся в толще земли, создавал подъемную силу.

Вряд ли Свифт мог предполагать, что через два столетия ученые и конструкторы реализуют эту безумную идею. Правда, они это сделают в несколько ином масштабе. Эффект механического отталкивания используется для создания магнитного подвеса. Наиболее простой вариант такого устройства схематически изображен на рисунке 55,а.

Сверхпроводящий диск  $D$  опускается на сверхпроводящую катушку  $K$ , в которой течет незатухающий ток. На этом принципе можно создать различные устройства, которые позволяют обеспечить устойчивую подвеску в одном, двух или трех направлениях. На рисунке 55,б изображен подшипник, устойчивый в одном направлении, а на рисунке 55,в показано применение этого принципа подвески подшипника на все три направления в пространстве; ротором в данном случае является шар.

Подобные магнитные подвесы могут работать в самых различных устройствах. Особенно они удобны в тех случаях, когда тело, подвешенное в магнитном поле, должно вращаться с большим числом оборотов. Здесь необходимо избегать замороженных магнитных потоков, так как при вращении они приводят к потерям. Таким путем можно получить подшипники, прак-

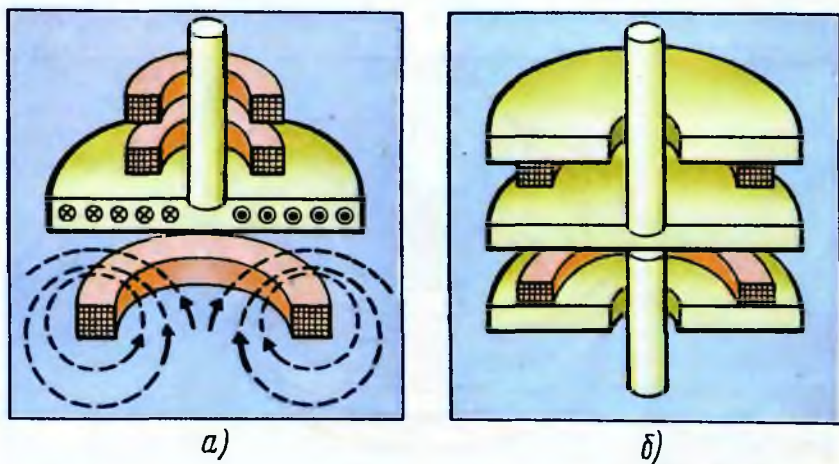


Рис. 55

а)

б)

тически не обладающие трением, вплоть до максимальных скоростей вращения. Верхний предел числа оборотов ограничивается лишь механической прочностью материала ротора. В одной из моделей ниобиевый ротор в форме шестигранника удалось раскрутить меняющимся полем до 20 тыс. оборотов в минуту!

А вот еще одна перспектива. В космических аппаратах, самолетах, на кораблях, подводных лодках, в системах навигации используются гироскопы. Основу их составляет гироскоп — быстро вращающийся волчок, который сохраняет неизменным свое положение в пространстве. Погрешность гироскопа зависит главным образом от трения в подшипниках. Уже эксплуатируются сверхточные гироскопы, в которых ниобиевый шарик, висящий в магнитном поле, после получения импульса может вращаться без трения в течение весьма длительного времени. За сутки дрейф таких гироскопов достигает примерно  $2^\circ$ .

Но самая заманчивая перспектива — использование эффекта механического отталкивания — связана с работами по созданию транспорта на магнитной подвеске.

## ПОЕЗДА БЕЗ КОЛЕС

Уже много лет обсуждаются возможности увеличения скоростей железнодорожного транспорта. Но превысить скорость 300...350 км/ч вряд ли удастся: сила тяги становится недостаточной, чтобы преодолеть сопротивление воздуха даже для поездов обтекаемой формы. Кроме того, при скоростях выше 300 км/ч, как показали исследования, исчезает надежное сцепление колеса с рельсом.

А что, если отказаться от колес — от жесткого контакта вагона с землей? Уже проанализированы и опробованы десятки возможных решений. И начинать всякий раз приходится с главного: как обеспечить подвеску вагонов и осуществить их тягу?

Еще в 1927 г. К. Э. Циолковский предлагал использовать для этой цели реактивные двигатели. Однако это решение не очень перспективно: известные ограничения скорости остаются. Нежелательны сильный шум, загрязнение воздуха выхлопными газами. Можно воспользоваться и пропеллерной тягой. Американские инженеры предложили, например, проект радиовоздушного состава, спрятанного в трубу. Тягу обеспечивает винт — электродвигатель, получающий энергию высокочастотным излучением от стен туннеля. Тормозить и разгонять состав можно за счет сжатия или расширения воздуха. Проект, конечно, интересный, но экономически нереальный. Передача энергии электромагнитным пучком, сооружение трубы-пути — все это будет стоить очень недешево.

Проектов много. Предлагаются даже такие экзотические варианты, как поезда, висящие на водяных струйках и толкаемые водой. На фоне этих проектов исключительно выигрышно смотрится идея создания поездов на «магнитной подушке». Магнитное поле вместо колес. Идея эта не нова,

она была высказана еще в начале нашего века. В 1911 г. профессор Томского политехнического института Б. П. Вейнберг создал модель магнитного туннеля. Находящаяся внутри трубы железная платформа с большой скоростью пролетала по туннелю, двигаясь от одного электромагнита, стоящего на ее пути, к другому.

Платформы с магнитной подвеской привлекательны во многих отношениях. Это и отсутствие шума при движении, и плавность хода, и устранение вибраций... Но чтобы эти принципиальные преимущества стали реальностью, необходимо было преодолеть большие технические трудности. Ведь осуществить магнитный подвес можно по-разному: посредством постоянных магнитов, электромагнитов или электродинамическим способом. Выбор богат, и все же наиболее перспективны подвески на сверхпроводниках с их традиционными преимуществами — возможностью достижения сильных магнитных полей при одновременном значительном снижении массы магнитов.

Здесь используется следующий принцип. В отдельных вагонах поезда устанавливаются катушки, создающие довольно сильное магнитное поле (рис. 56). Поездной электромагнит 1 делают сверхпроводящим. Он охлаждается жидким и газообразным гелием. При движении поезда в алюминиевых полосах-рельсах 2 наводятся вихревые токи, которые по правилу Ленца создают магнитное поле, направленное навстречу вызвавшему их магнитному полю, в нашем случае полю магнитов, расположенных в поезде. Это поле и создает силу отталкивания. Поезд-вагон приподнимается над эстакадой электромагнитными силами. Горизонтальная часть полосы-рельса 3 создает при этом подъемную силу, а вертикальная обеспечивает боковую устойчивость поезда. Между шинами-полосами проложен третий рельс — линейный двигатель, который и приводит поезд в движение.

Для создания силы тяги можно использовать, вообще говоря, любой автономный двигатель, например авиационный мотор. Но конструкторы предложили более интересный вариант: использовать для приведения поезда в движение дорогу, по которой этот поезд движется. «Развернуть» привычный

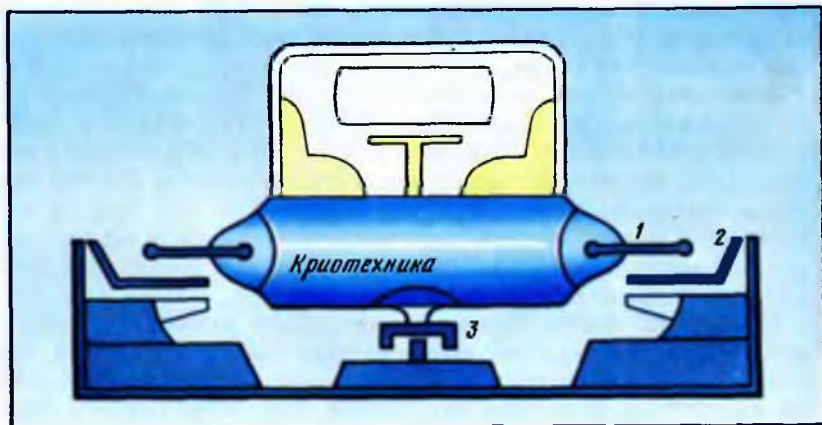


Рис. 56

нам электродвигатель так, что дорога будет играть роль статора, а поезд — ротора. При этом вращательное движение ротора сменится поступательным. Подобная конструкция получила название *линейного* электродвигателя. Для обеспечения работы такого двигателя на дорогу придется укладывать множество проводящих стержней, в которые по специальной программе нужно подавать ток. Сверхпроводящая катушка на борту вагона может подтягиваться токами дороги. Токи смещаются — поезд движется вслед за ними. При этом просвет между вагоном и дорогой можно увеличить до 0,3 м, что поможет решить проблему безаварийного движения.

В сверхпроводящих опорах подъемная сила при поле с индукцией 1 Тл может достигать  $4 \cdot 10^5$  Н на квадратный метр, что примерно равно давлению воздуха в шинах автобуса. Вполне реально увеличить магнитное поле в 2...3 раза. Увеличить надежность помогает резервирование катушек и предотвращение потерь проводом, находящимся в сверхпроводящем состоянии. В целом создание высоконадежной магнитной системы вполне реально. Работы, связанные с созданием транспорта на «магнитной подушке», сейчас ведутся широко. Оцениваются достоинства различных конструкций, отрабатываются способы подвески. форсируется работоспособность соленоидов.

Вот один из проектов, который японские инженеры предполагают осуществить в ближайшее время. На скоростной магистрали между Токио и Осака протяженностью 500 км будет курсировать первый сверхпроводниковый поезд. В днище скоростного вагона-поезда разместятся сверхпроводящая обмотка возбуждения, криогенное хозяйство, металлические экраны для защиты пассажиров от мощных магнитных полей. Вдоль всего пути будут уложены в горизонтальной и вертикальной плоскостях замкнутые контуры из толстых алюминиевых полос, статорные проводники — вдоль эстакады, ротором будет сам поезд. Вдоль пути побежит магнитная волна, которая как бы потянет за собой вагон-поезд. Очень важно, что энергия будет подаваться на него через магнитное поле бесконтактным путем.

Разгон и торможение должны производиться с помощью колес. Резиновые колеса будут убираться и опускаться, как при взлете и посадке самолета (отсюда и термин «магнитоплан»). Электромагнитные силы поднимут поезд над эстакадой, и он полетит со скоростью 500 км/ч. Такой поезд соединит в себе все лучшее, что есть в авиационном и железнодорожном транспорте. От самолета ему достанется высокая скорость, от поезда — большая вместимость, надежность, возможность функционировать в любую погоду.

## КОРАБЛИ БЕЗ ВИНТА

Сверхпроводники могут оказать большую услугу не только наземному транспорту, но и подводным кораблям. При стесненных габаритах и ограниченном водоизмещении на корабле можно установить легкие, компактные и в то же время мощные генераторы и двигатели.

Но усовершенствование судовых электроустановок не устраняет недо-

статков двигателя с гребным винтом, который не может обеспечить большую скорость хода и вызывает большой шум. Здесь весьма перспективен магнитогидродинамический двигатель — МГД-двигатель.

Мы знаем, как работает МГД-генератор: если пропустить через МГД-канал рабочее тело (например, низкотемпературную плазму), то под воздействием магнитного поля оно будет отклоняться к электродам. Но известно, что электрические машины, как правило, обратимы. Следовательно, МГД-установка может превращать кинетическую энергию плазмы в электрическую или же, напротив, ускорять плазму с помощью магнитных сил за счет потребления энергии извне. В этом случае это уже ускоритель, или инжектор плазмы. Такой плазменный ускоритель, по существу, аналогичен обычному электродвигателю, в котором роль якоря играет текущая плазма.

А теперь представьте себе трубу, заполненную электропроводящей жидкостью. Если пропустить через нее электрический ток, то под воздействием магнитного поля жидкость будет выбрасываться из канала. Так работает МГД-двигатель. В нем морская вода (рабочее тело) ускоряется электромагнитными силами в результате взаимодействия пропускаемого через воду тока с магнитным полем.

Вот один из проектов реактивной подводной лодки с МГД-двигателем. Проточная часть двигателя выполняется в виде кольцевого канала, расположенного между внешним и внутренним корпусами лодки, которые одновременно являются и магнитопроводами двигателя (рис. 57). Трехфазный ток, проходящий через обмотки, порождает магнитное поле, бегущее от носа лодки к корме. В морской воде в канале индуцируются токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем приводит к появлению в воде магнитной силы, направление которой совпадает с направлением движения поля. И лодка ведет себя подобно кальмару — она как бы отталкивается от воды, приходя таким образом в движение. По расчетам подобный двигатель может обеспечить лодке скорость хода до 90 км/ч.

Наряду с описанным индукционным двигателем разрабатывается и двигатель кондукционного типа. В этом случае лодка также состоит из внешнего и внутреннего корпусов, между которыми располагаются стержневые магниты, создающие в канале магнитное поле. Внешний и внутренний корпусов, изолированные при помощи прокладок, представляют собой электроды, на которые подается напряжение таким образом, что ток через

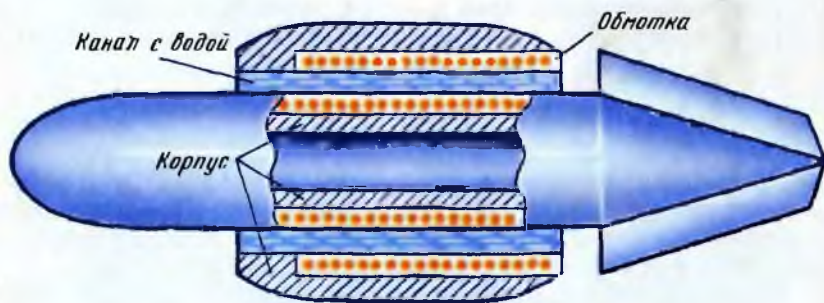


Рис. 57

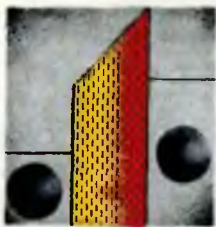


морскую воду идет в радиальном направлении. Взаимодействие магнитного поля с током приводит к появлению в морской воде сил, обуславливающих тягу двигателя. Скорость хода судна с таким двигателем может достигать 70 км/ч.

Применение МГД-двигателя на кораблях сулит многие преимущества. Это и повышение скорости, и понижение уровня шумов, вибрации. Однако при использовании традиционных магнитов МГД-двигатель окажется малоэффективным: КПД его мал из-за низкой электропроводности морской воды и недостаточной величины магнитной индукции. При использовании же электромагнитов возникают большие потери в обмотках. Лишь применение сверхпроводящих магнитных систем, обеспечивающих сильные магнитные поля, сделает реальным идею МГД-двигателя — бесшумного, компактного, без вращающихся частей.

И в заключение несколько слов о космических «профессиях» сверхпроводящих магнитов. Сильные магнитные поля сверхмагнитов могут быть использованы для экранирования космических кораблей от проникающей радиации. Хорошо известно, что в космосе имеются области повышенной радиации. Всех нас защищает от радиации магнитное поле Земли. Оно искривляет траектории заряженных частиц и не позволяет многим из них достигнуть поверхности Земли. Но если космонавт совершает полет на борту космического корабля, то он может оказаться в зоне повышенной радиации, например, при прохождении так называемых радиационных поясов. Ясно, что для безопасности полета космический корабль необходимо по примеру Земли окружить магнитным полем. Но в космос громоздкие и прожорливые электромагниты не возьмешь — на корабле должна находиться компактная сверхпроводящая магнитная система, создающая надежную магнитную защиту.

В космических аппаратах и на автоматических межпланетных станциях найдут себе применение и плазменные двигатели — своеобразные плазменные пушки, из которых можно выстреливать сгустки плазмы со скоростью более 100 км/с. Это в 100 раз быстрее пули и в 10 раз быстрее космической ракеты. Конечно, заставить взлететь с Земли космическую ракету такие двигатели вряд ли смогут: слишком уж мала их тяга. Но взлет — только первая, самая начальная и короткая фаза обычного космического полета. Когда ракета выходит из сферы действия сильных гравитационных полей, даже ничтожно малая сила способна вызвать ускорение. В этих условиях плазменный двигатель сможет сослужить не одну хорошую службу.



## СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Можно утверждать, что по крайней мере в обозримом будущем сверхпроводящая электроника будет самой передовой техникой, обеспечивающей предельные показатели — высокое быстродействие, высокую точность и высокую чувствительность.

*Д. Мак-Дональд*

Важные и интересные «профессии» сверхпроводников связаны с электронной техникой. Возникшая на этой базе новая область электроники — электроника низких температур — получила название криогенной электроники или просто криоэлектроники.

Криоэлектроника очень молодая наука, в использовании ее замечательных возможностей делаются еще только первые шаги. Но несмотря на свою молодость, криоэлектроника имеет уже существенные достижения и обнадеживающие перспективы. Этому способствовали, с одной стороны, широкие исследования явлений, происходящих в твердом теле при низких температурах, а с другой — определенные достижения криогенной техники, позволившие разработать экономичные, малогабаритные и надежные системы охлаждения.

Значительным стимулом к развитию криоэлектроники послужила также необходимость решения сложных проблем, стоящих перед создателями новой электронной техники.

Использование явления сверхпроводимости позволяет преодолеть многие препятствия и открывает новые пути в разработке электронных устройств. Особенно захватывающими кажутся перспективы использования эффектов слабой сверхпроводимости. Эти тонкие эффекты, ответственные за появление туннельных токов, позволяют создавать принципиально новые приборы и устройства.

Рассказать обо всей криоэлектронике невозможно: применения ее многочисленны и разнообразны. Для всех наиболее важных элементов традиционной электроники имеются сверхпроводящие аналоги. Мы опишем здесь лишь некоторые из них, те, которые, на наш взгляд, чем-то обращают на себя особое внимание. В одних случаях это невероятная чувствительность и точность, в других — неожиданность применения или необычность эффекта и др.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ

За последние годы электроникой создано множество измерительных приборов. И это естественно: ведь проведение измерений стало сегодня важнейшей областью науки и техники. От приборов требуется многое и все чаще высокая точность, быстродействие, чувствительность на грани возможного. И вот здесь на помощь электронике приходят сверхпроводники. Дополняя своими нестандартными качествами возможности имеющихся измерителей, они расширяют диапазон их действия.

Так, исчезновение электрического сопротивления при переходе в сверхпроводящее состояние позволяет сконструировать чувствительные датчики малых электрических сигналов. Сверхпроводящие гальванометры, например, оказались в 100...1000 раз чувствительнее обычных. Благодаря чрезвычайно малому внутреннему сопротивлению такие гальванометры способны уловить напряжения порядка  $10^{-11}$ ... $10^{-12}$  В.

Изменение свойств сверхпроводников при переходе из нормального состояния в сверхпроводящее также может быть использовано для создания высокочувствительных измерителей. Самая простая функция таких измерителей связана с определением температур, магнитных полей и токов, которые непосредственно сравниваются с критическими параметрами сверхпроводника. Вспомните, как резко меняются свойства металлов при фазовом переходе. Снизилась температура до критической величины, и металлическая пластинка — датчик скачком теряет сопротивление. Улавливая скачки сопротивлений, можно запускать в работу различные регуляторы, управляющие режимом сверхпроводящих устройств. А набор пластин из разных сверхпроводников может помочь зарегистрировать температуру некоторых характерных точек: сработал, скажем, датчик индия — это соответствует температуре 3,4 К, потерял сопротивление свинец — 7,2 К и т. п. Тот же принцип используется в датчиках магнитного поля или тока: в момент измерения проводимости генерируется электрический сигнал.

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

С помощью сверхпроводников можно уловить чрезвычайно слабое излучение. Для этой цели используют приборы, называемые *болометрами*.

Назначение болометра состоит в измерении мощности теплового излучения, как правило, очень слабого. В сверхпроводниковых болометрах мерой мощности принимаемого излучения служит изменение электрического сопротивления. На рисунке 58 представлена температурная зависимость сопротивления чистого олова в области температуры его перехода. Если падающее излучение может вызвать хотя бы незначительное изменение температуры образца олова (например, на  $10^{-4}$  К), то легко можно измерить вызванное при этом увеличение сопротивления. Такие болометры используют в инфракрасной области длин волн (примерно от 10 до 1000 мкм), где измерить мощность излучения другими средствами трудно.

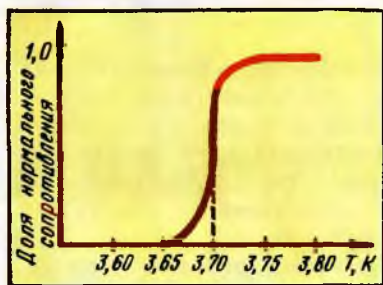


Рис. 58

сравнения скажем, что предел чувствительности нашего слуха составляет примерно  $10^{-12}$  Вт, а зрения — около  $10^{-18}$  Вт. Но в отличие от наших органов слуха и зрения болометр является объективным прибором и вместе с тем реагирует на излучение в очень широком диапазоне длин волн. Кроме того, очень высока чувствительность сверхпроводящих болометров к изменению их температуры. Можно получить изменение сопротивления в 1000 Ом на каждый градус. Такие сопротивления легко фиксировать, поэтому болометры могут уловить ничтожно малый тепловой сигнал. Крошечные сверхпроводящие площадки размером в несколько квадратных миллиметров могут надежно улавливать сигнал мощностью порядка  $10^{-12}$  Вт. Правда, резкость кривой фазового перехода требует высокой точности поддержания рабочего режима.

Сверхпроводники плохо проводят и запасают тепло, так что полученная доза излучения не расплывается по чувствительному элементу — датчику, а действует всей своей величиной в определенном месте.

Назначение болометра — изменять свое сопротивление под действием очень слабого теплового излучения — предъявляет особые требования к конструкции прибора.

Чувствительный элемент — датчик представляет собой фольгу или пленку, напыленную на тонкую слюдяную подложку. Датчики обычно изготавливают из олова, тантала или нитрида ниобия и свободно подвешивают в некотором объеме, охлаждаемом жидким гелием. Для пропускания излучения корпус приемника должен иметь окно, прозрачное в требуемой области длин волн.

Сверхпроводящие приемники могут быть использованы также для регистрации  $\alpha$ -частиц или других частиц высокой энергии. При попадании частицы в сверхпроводящую пленку происходит локальный разогрев, в результате чего какой-то участок пленки вдоль пути частицы на короткое время переходит в нормальное состояние.

В измерительной схеме, присоединенной к приемнику, появляется импульс напряжения. Достоинством таких детекторов является их быстродействие: за 1 с сверхпроводниковый счетчик способен регистрировать около 10 млн. частиц!

Сверхпроводящие болометры обладают весьма существенными достоинствами. В связи с тем что они работают при низких температурах, в них очень слабы так называемые флуктуационные шумы. Естественно, что внешнее излучение, мощность которого имеет тот же порядок или меньше мощности тепловых шумов, надежно измерить невозможно: сигнал от него тонет в шумах. Для болометра со сверхпроводниковым приемником площадью  $3 \times 3$  мм при температуре 4 К и времени измерения 1 с мощность шумов составляет  $10^{-16}$  Вт. Для

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Мы уже убедились в том, что сверхпроводники могут помочь электронике в решении многих проблем. Расскажем еще об одном интересном и важном применении сверхпроводников. В этот раз речь пойдет о технике высоких частот. На очень высоких частотах, порядка  $10^{10}$  Гц (это область сантиметровых волн), вместо колебательных контуров (конденсатора и катушки), как правило, используются объемные резонаторы.

*Объемный резонатор* — устройство несложное. В простейшем случае он представляет собой замкнутую полость прямоугольной формы с электропроводящими стенками. В таких полостях можно возбуждать электромагнитные колебания, при которых внутри полости существуют переменные электрические поля, а по стенкам текут высокочастотные переменные токи. Частота колебаний зависит от геометрических размеров резонатора и от пространственной структуры переменных полей и токов.

В любых резонаторах часть энергии высокочастотных колебаний превращается в тепло и, следовательно, теряется. Поэтому колебания, если их не поддерживать, постепенно затухают. Резонаторы с малым затуханием обладают большими достоинствами. Прежде всего затухание определяет ширину линии резонанса. Чем сильнее затухание, тем более широкими, размытыми получаются резонансные линии.

Качество резонаторов характеризуют специальной величиной, называемой *добротностью*. По своему смыслу она соответствует отношению запасенной в поле энергии к потерям энергии в стенках за один период колебаний. Добротность резонатора, таким образом, обратно пропорциональна электрическому сопротивлению его стенок. Чем меньше сопротивление материала стенок, тем меньше тепловые потери и выше добротность резонатора. Ясно, что применение сверхпроводников, не обладающих электрическим сопротивлением, является с этой точки зрения весьма перспективным.

---

Отметим одно обстоятельство, которое раньше, в предыдущих главах, осталось в тени. То, что сверхпроводник не проявляет сопротивления постоянному току, нам хорошо известно. А вот переменному току он, как выяснилось, оказывает определенное конечное сопротивление (особенно на высоких частотах).

Неожиданного здесь ничего нет. Вспомните «двухжидкостную» модель сверхпроводника: ток в нем переносится как нормальными, так и сверхпроводящими электронами. Нормальные электроны ведут себя обычным образом: они теряют энергию из-за рассеяния и в результате возникает сопротивление материала. Они обладают массой, а следовательно, инерцией, которая обуславливает индуктивность образца.

Сверхпроводящие электроны не рассеиваются и поэтому не вносят вклада в сопротивление. Но они, так же как и нормальные электроны, имеют массу и инерцию и вносят вклад в создание индуктивности образца.

В случае постоянного, не изменяющегося во времени тока весь ток осуществляется сверхпроводящими электронами. Сверхпроводник подобен двум параллельным

проводникам: одному с нормальным сопротивлением, другому с сопротивлением, равным нулю. Можно сказать, что «сверхпроводящие электроны замыкают накоротко нормальные».

Если теперь материал поместить в переменное электрическое поле, то ситуация изменится. Сверхпроводящий ток будет отставать в силу инерции сверхпроводящих электронов, и ток разделится между двумя ветвями обратно пропорционально величинам их полных сопротивлений. Каждая из этих величин конечна, поэтому ток будет протекать и в той и в другой ветви. Ток, текущий в правой ветви, создается нормальными электронами, которые и обуславливают сопротивление.

Таким образом, пока в сверхпроводнике существует изменяющийся во времени ток, в принципе в нем существует сопротивление. При достаточно высоких частотах сверхпроводник ведет себя так же, как и нормальный металл. Но это происходит, как показал анализ, при частотах, больших  $10^{10}$  Гц. До этих частот лишь очень малая часть тока переносится нормальными электронами, и соответствующие потери энергии практически ничтожны. Сверхпроводник, по существу, остается с нулевым сопротивлением, и ситуация мало чем отличается от случая постоянного тока.

Именно это обстоятельство и позволило предположить, что при использовании сверхпроводников в качестве материала стенок можно будет получить резонаторы со сколь угодно малым затуханием.

Сверхпроводящие резонаторы позволяют получать значения добротности  $10^{11}$  — это в миллион раз выше, чем в конструкциях с омедненными или посеребренными стенками. Такие резонаторы с очень малым затуханием, а значит, и с очень узкими резонансными линиями можно использовать как сверхточные эталоны частоты. В электронных микроскопах эти резонаторы обеспечивают огромное разрешение, малые помехи при простой регулировке.

## ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Интерес к высокодобротным сверхпроводниковым резонаторам еще больше возрос в связи с возможностью их применения в линейных ускорителях заряженных частиц.

Эти конструкции по своему устройству и принципу действия несложны. Здесь частицы ускоряются в прямолинейной вакуумной камере под действием переменного электрического поля. Схематически такое устройство показано на рисунке 59.

Ускоритель состоит из ряда объемных резонаторов, колебания которых согласованы между собой таким образом, чтобы пролетающие частицы постоянно ускорялись бы полем каждого последующего резонатора. Образно говоря, электрическое поле резонатора всякий раз «подхлестывает» ускоряемые частицы. Поскольку речь идет о переменных полях, то в каждом периоде можно ускорить только те частицы, которые попали в резонатор в полупериод с благоприятным направлением поля.

Такие ускорители могут работать только в режиме отдельных импульсов. Разгон частиц обычно приходится ограничивать тысячной частью длитель-

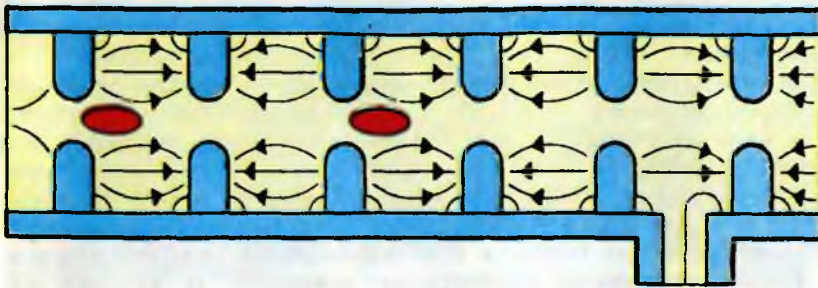


Рис. 59

ности рабочего цикла. Это связано с большими потерями энергии в резонаторах. При непрерывной работе стенки ускорителя перегреваются, а энергия питания становится неприемлемо большой. В ускорителе со сверхпроводящими резонаторами, имеющими очень малые потери, пучки частиц могли бы разгоняться практически без остановок. При более высоких скоростях удалось бы снизить плотности частиц при том же среднем токе и тем самым сильно уменьшить влияние случайных процессов, представляющих серьезную помеху при исследовании очень редких событий.

И еще одно немаловажное обстоятельство. Современные линейные ускорители — это довольно крупные и дорогостоящие сооружения. Их длина составляет сотни метров. В Стенфордском университете, например, для сообщения частицам энергии 20 ГэВ пришлось вытянуть канал ускорения до 3 км. Сверхпроводящие резонаторы позволяют сократить длину канала за счет роста ускоряющих электрических полей. Ускоритель становится короче, и стоимость его уменьшается. Анализ показал, что даже с учетом всех затрат на охлаждение до весьма низких температур порядка 1,8 К сверхпроводящий ускоритель только за счет экономии потребляемой энергии был бы значительно дешевле обычного.

Работы, связанные с постройкой ускорителей со сверхпроводящими резонаторами, уже ведутся. Созданы опытные резонаторы, идет сравнение результатов. Проблем, конечно, много, и ученым предстоит еще большая работа, прежде чем такие ускорители станут реальностью.

## СЛАБOSВЯЗАННЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Новые возможности открылись перед электронной техникой в связи с освоением эффектов *слабой сверхпроводимости*.

Сверхпроводники, разделенные тонким слоем диэлектрика (туннельные контакты Джозефсона, о которых мы вам уже рассказывали), оказались идеально приспособленными к использованию в самых различных областях криоэлектроники. Такие контакты устанавливают, как говорят физики, *слабую связь* между двумя сверхпроводниками. Слабую не из-за своей механической прочности. Слаб сам электрический контакт сверхпроводни-

ков: из-за малой площади контакта для его «разрушения», нарушения его сверхпроводимости достаточно даже небольшого тока, возбужденного внешними полями.

Уже первые опыты со слабой сверхпроводимостью (или со слабосвязанными сверхпроводниками) показали, что параметры многих устройств электронной техники могут быть заметно улучшены. Физики разобрались в природе соответствующих явлений, а технологи смогли построить недорогие элементы, пользуясь известной технологией тонких пленок. Именно это обстоятельство и позволило сверхпроводящей электронике проникнуть в удивительную область, где точность измерений дошла уже до пределов, налагаемых фундаментальными физическими законами. И конечно же, появились новые интересные приборы: генераторы, усилители, детекторы излучения, переключатели...

---

Основой всех этих приборов является одна деталь — *слабый сверхпроводящий контакт*. Состоит он из разных частей, и создаются они разными способами. Вот как выглядит в общих чертах процесс изготовления джозефсоновского контакта.

Взяв за основу керамическую или стеклянную пластинку — подложку, наносят на нее пленку сверхпроводника (обычно ее получают, напыляя металл в вакууме). Первоначально для этой цели использовались легкоплавкие металлы, такие, как индий, олово, свинец, а в последнее время все большее применение получают тугоплавкие сверхпроводники, в основном ниобий.

Следующий этап — образование барьерного слоя, как правило, это слой окисла на поверхности пленки. Получают его путем окисления пленки в слабом высокочастотном разряде в атмосфере кислорода. Этот слой должен быть тонким (10...20 Å), ровным, плотным, не иметь пор и не меняться со временем. Главная его функция — это установление слабой связи между сверхпроводниками, т. е. создание между ними зоны с малой концентрацией электронных пар. Эта зона должна обеспечивать хотя и конечный, но слабый обмен электронными парами и тем самым образовывать необходимую слабую связь.

Затем поверх окисного слоя напыляют вторую (обычно свинцовую) сверхпроводящую пленку, и этим изготовление туннельного перехода завершается. В результате получается так называемый «сендвич», который для удобства измерений обычно делают в виде креста, как показано на рисунке 60.

Уже вскоре после экспериментального открытия эффектов Джозефсона выяснилось, что слабая связь между сверхпроводниками может быть образована не только с помощью окисного слоя. Такими же в принципе характеристиками, как и туннельные контакты, обладают и контакты другого вида, например структуры типа *SNS* — сверхпроводник — нормальный металл — сверхпроводник, узкие перемычки в сверхпроводнике, точечные контакты между острием и пластинкой из сверхпроводника, наконец, пластинка из сверхпроводящего материала с узкой накладкой из нормального металла. Все эти варианты слабой связи схематически можно представить на рисунке 61.



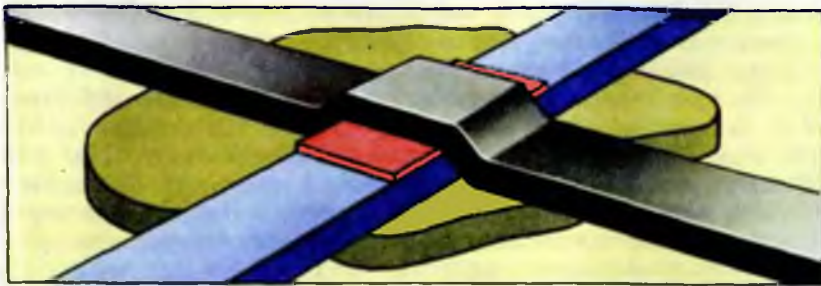


Рис. 60

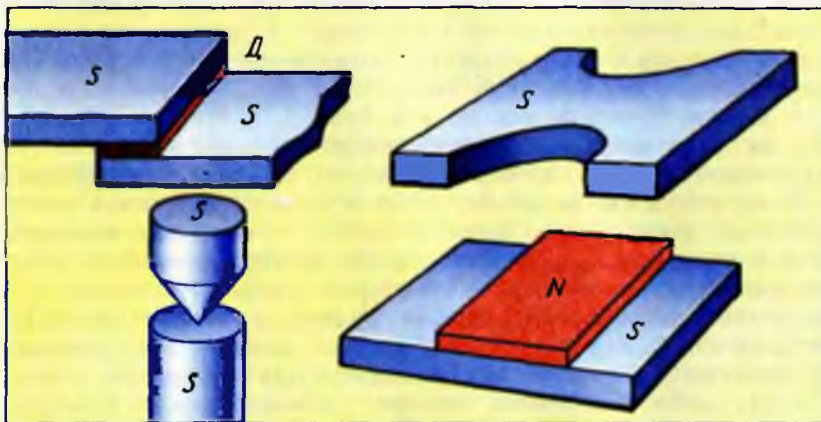


Рис. 61

Отличаются они друг от друга устойчивостью вольт-амперных характеристик. При нарушении сверхпроводимости цепи, включающей слабые звенья, внешнее поле даже небольшой величины вызывает быстрый рост напряжения в цепи, что и обеспечивает чрезвычайно высокую чувствительность разнообразных приборов, использующих этот эффект.

### С ПОМОЩЬЮ ТУННЕЛЬНЫХ КОНТАКТОВ

Уже в первой своей публикации в журнале «Физикс Леттерс» Джозефсон с удивительной полнотой описал возможные физические следствия эффекта и их использование. В частности, он обратил внимание на то, что такие хорошо измеряемые макроскопические величины, как частота и напряжение, линейно связаны с отношением фундаментальных констант, заряда электрона и постоянной Планка:  $h\nu = 2eU$ .

По возможности точное измерение различных физических констант — одна из важнейших для физики задач. Это отнюдь не всегда просто. Поэтому чуть ли не первым практическим применением эффекта Джозефсона

было измерение с недоступной ранее точностью весьма важной величины  $e/h$ . Эти измерения — одно из замечательнейших достижений физики; отношение  $e/h$  известно сейчас с погрешностью, меньшей  $10^{-4}\%$ .

И еще одно. Вы заметили, что в выражение для частоты джозефсоновского излучения входит удвоенный заряд электрона — надо помнить, что туннелируют не отдельные электроны, а сверхпроводящие пары. И то, что на опыте действительно наблюдается излучение с частотой, пропорциональной удвоенному заряду электрона, можно рассматривать как экспериментальное подтверждение правильности теоретических представлений о существовании в сверхпроводниках связанных электронных пар.

Вот какой удивительный эффект был предсказан Джозефсоном: постоянное напряжение, приложенное к сверхпроводящему туннельному контакту, приводит к генерации электромагнитного излучения. И первое, что приходит в голову, если говорить о практическом использовании джозефсоновских туннельных контактов, — это создание генератора электромагнитного излучения. Но в действительности все не так просто: излучение довольно трудно вывести из узкой щели между сверхпроводящими пленками, где оно генерируется (именно поэтому экспериментальное обнаружение эффекта Джозефсона было непростой задачей), да и мощность излучения очень мала — триллионные доли ватта. Поэтому сейчас туннельные контакты используются в основном в качестве детекторов электромагнитного излучения, но зато самых чувствительных в некоторых диапазонах частот.

Такое применение основано на явлении резонанса между внешними электромагнитными колебаниями (в регистрируемой волне) и собственными колебаниями, возникающими в туннельном контакте при приложении к нему постоянного напряжения. Собственно говоря, резонанс лежит в основе работы многих приемников: волну удается поймать, когда ее частота совпадает с частотой приемного колебательного контура. В качестве приемного контура удобно использовать джозефсоновский туннельный контакт: частоту его собственных колебаний легко подстраивать (изменяя напряжение), а острота резонанса, определяющая чувствительность приемника, оказывается очень высокой. По такому принципу уже созданы исключительно чувствительные приемники электромагнитного излучения, которые используются для исследования излучения Вселенной.

Высокая чувствительность туннельных контактов приводит порой к неожиданным возможностям их практического использования. Можно создать, например, гальванометр, использующий способной слабой сверхпроводящей связи переносить критический ток и в то же время допускать магнитный поток. В литературе его часто называют сверхпроводящим малоиндуктивным гальванометром — СЛАГ от английского названия этого прибора (superconducting lowinductance undulatory galvanometer).

Чтобы изготовить джозефсоновский туннельный контакт для СЛАГа, на очень тонкую ниобиевую проволоку наносят каплю припоя из сверхпроводящего материала, например олово—свинец. Из-за присутствия на поверхности ниобия окисной пленки капля смачивает проволоку не полностью, а касается ниобия только в отдельных точках. При этом образуется как бы много-

чечный контакт. Если теперь по проводу пропустить ток, подлежащий изменению, то второй ток, зависящий от величины первого, между проводом и периметром капли припоя несложно измерить. Можно довольно легко обнаружить изменение тока порядка  $10^{-7}$  А. Разумеется, с помощью такого инструмента можно измерить и очень малые напряжения, если источник напряжения сам имеет малое внутреннее сопротивление.

СЛАГ можно превратить в высокочувствительный магнитометр, если ниобиевую проволочку свернуть в кольцо, т. е. создать сверхпроводящий замкнутый контур. По напряжению и току в местах слабой связи удастся замерить магнитные поля ничтожно малой величины. Однако по своей чувствительности устройства такого типа примерно на два порядка уступают другой группе магнитометров, известных под названием СКВИД — сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы.

## КВАНТОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

Простейший квантовый магнитометр — СКВИД представляет собой сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими туннельными контактами. Схематически такое устройство показано на рисунке 62. Это полный аналог столь популярного в оптике опыта с интерференцией от двух щелей, только здесь интерферируют не световые волны, в два джозефсоновских тока  $I_1$  и  $I_2$ , каждый со своей амплитудой и фазой. Концы сверхпроводников 1 и 2 присоединены к прибору, который измеряет ток, равный сумме (с учетом фаз!) токов  $I_1$  и  $I_2$ . Таким образом, в СКВИДе волна сверхпроводящих электронов расщепляется на две, каждая из которых проходит свой туннельный контакт, а затем обе половинки сводятся вместе.

СКВИДы бывают двух типов: СКВИД, работающий на постоянном токе, и СКВИД, работающий на переменном высокочастотном токе. СКВИД на переменном токе устроен несколько проще, он содержит один контакт, но описание его работы сложнее, и поэтому мы здесь рассмотрим работу магнитометра на постоянном токе.

Поскольку оба туннельных контакта одинаковы и расположены симметрично, то в отсутствие поля созданный предварительно постоянный ток разделится между ними поровну, фазы его одинаковы и никакой интерференции не возникает. Но если теперь включить магнитное поле, то оно будет наводить в контуре циркулирующий сверхпроводящий ток. Этот ток, направленный, например, по часовой стрелке, в контакте 1 будет вычитаться из постоянного внешнего тока, а в контакте 2 складываться. Теперь обе ветви будут иметь разные токи, туннельные контакты разбалансируются, между ними возникнет раз-

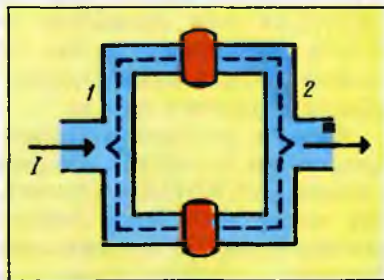


Рис. 62

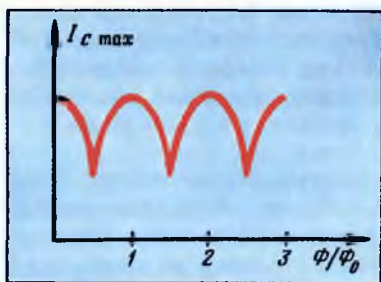


Рис. 63

ность фаз. Волны сверхпроводящих электронов, пройдя через контакты и вновь соединившись, будут интерферировать. Интерференция проявится как зависимость критического тока СКВИДа  $I_k$  от внешнего магнитного поля.

Эта зависимость показана на рисунке 63 (магнитный поток измеряется в естественных единицах — квантах потока  $\Phi_0$ ). Таким образом, критический ток контура с двумя джозефсоновскими контактами осциллирует в зависимости от внешнего поля, достигая максимума, когда пронизывающий

контур магнитный поток равен целому числу квантов. Такой ступенчатый характер зависимости позволяет «чувствовать» отдельные *флюксиды* — кванты потока, хотя величина их очень мала (порядка  $10^{-15}$  Вб). Нетрудно понять почему. Магнитный поток внутри контура меняется хотя и на малую величину:  $\Delta\Phi = \Phi_0$ , но скачком, т. е. за очень короткий промежуток времени  $\Delta t$ . Так что скорость изменения магнитного потока  $\Delta\Phi/\Delta t$  при таком скачкообразном характере изменения потока оказывается очень большой. Ее можно измерить, например, по величине ЭДС индукции, наводимой в специальной измерительной катушке прибора. В этом и состоит принцип работы квантового магнитометра.

Сегодня сверхчувствительные магнитометры, измеряющие индукции магнитных полей с точностью до  $10^{-15}$  Тл, — это уже промышленная продукция, находящая широкое применение в измерительной технике. С их помощью удалось осуществить ряд тонких экспериментов, исследовать новые физические явления. Вот некоторые примеры.

Сверхпроводящие магнитометры оказались очень удобными для измерений магнитной восприимчивости различных веществ — отношения их намагниченности к приложенному полю. Благодаря своей огромной чувствительности они позволяют измерить очень малые восприимчивости и восприимчивости очень малых количеств вещества. Это последнее обстоятельство особенно важно для биохимических исследований. Градиометры на СКВИДах уже позволили измерить предельно малую восприимчивость белков. Применялись они также для измерения восприимчивости различных геологических пород и даже для измерения магнитного момента образцов лунного грунта.

Физики, изучающие микромир, надеются, что квантовые магнитометры помогут им в поисках кварков и гравитационных волн. А вот геофизикам с помощью СКВИДов удалось зарегистрировать чрезвычайно слабые вариации магнитного поля Земли при различных катаклизмах (извержениях, землетрясениях). Установлено, например, что за несколько дней до землетрясения в области линии сдвига земной коры возникают возмущения магнитного поля. Такие данные, помимо их научного значения, могут оказаться ценным средством прогнозирования стихийных явлений.

Самое лучшее, что создает электроника, она с готовностью отдает медицине для сохранения жизни и здоровья человека. Стоило СКВИДам появиться на свет, как сразу же им и здесь нашлось применение. С их помощью удалось получить идеальную кардиограмму, но не электрическую, а магнитную, отобразив с невиданной точностью мельчайшие импульсы, сопровождающие работу сердца. Ведь те же самые токи, которые измеряются при снятии обычной электрокардиограммы (или электроэнцефалограммы), создают также магнитное поле. Токи эти очень слабы, и соответственно магнитные поля имеют порядок миллиардных и менее долей тесла. Понятно, что подобные измерения могут проводиться только в специально экранированных от посторонних магнитных полей помещениях. Это, конечно, усложняет их применение, но все искупается огромной чувствительностью квантовых магнитометров; с их помощью обнаруживаются такие явления, которые не удавалось обнаружить электрическими методами исследования. Очень ценными для медиков оказались, например, магнитографические исследования тонких физиологических процессов. Были зарегистрированы магнитограммы работы мышц, желудка, глаза при различных освещенностях и др. Недалек тот день, когда магнитограммы, снятые с помощью СКВИДов, принципиально изменят существующие возможности для диагностики сердечных заболеваний.

В заключение заметим, что основные системы со СКВИДАми еще полностью не изучены и их еще следует тщательно исследовать и изучать. Но уже сейчас устройства, основанные на применении особенностей контактов слабосвязанных сверхпроводников, следует рассматривать как технику, потенциально пригодную для решения любых приборных проблем, требующих предельно высоких параметров чувствительности, точности и быстроты действия.



## ГЛАВА 15

---

### ЭВМ

### НА СВЕРХПРОВОДНИКАХ

---

Зачем же обдумывать обдуманное?  
Бери готовое и иди дальше. В этом сила  
человечества.

*Л. Н. Толстой*

Современная электронная вычислительная машина — это сложный комплекс устройств и элементов, восхищающий своим технологическим совершенством и разнообразием физических принципов работы. Производительность, мощность, универсальность такой машины во многом зависят от того, как быстро она запоминает, как много сведений она может хранить в глубинах своей памяти и как быстро она может извлекать из этих глубин необходимую информацию. Каждое новое поколение ЭВМ должно иметь большее быстродействие (выполнять больше операций в единицу времени), больший объем памяти, меньшие размеры. И конечно, быть более надежным в работе.

### ЭТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ

Первые ЭВМ, созданные в конце 40-х годов на электронных лампах, были чрезвычайно громоздкими и столь же медлительными. Второе «полупроводниковое» поколение родилось в начале 60-х годов, но уже через несколько лет ему пришлось уступить место более энергичным представителям третьего поколения, технической особенностью которого стали интегральные схемы (ИС) — схемы, совмещающие в одном кристалле многие элементы различного назначения. Собственно, с этого поколения начался золотой век вычислительных машин — век микроэлектроники.

Каждая ступень усложнения интегральных схем — это новое поколение ЭВМ с новой, все более мощной памятью, с быстродействием, принципиально не достижимым предыдущими ЭВМ. Одновременно это и новые ступени микроминиатюризации. На основе больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем уже созданы персональные компьютеры, занимающие не залы или громоздкие ящики, а устройства величиной с том энциклопедии, но содержащие несравненно больший объем информации.

Сложность внутренней конструкции машин четвертого поколения на больших и сверхбольших интегральных схемах невероятно велика. Трудно найти аналог подобной системе четкого, слаженного взаимодействия миллионов элементов. И в то же время это сложнейшее электронное устройство

состоит из простых элементарных ячеек, называемых логическими схемами. В свою очередь их основой, а следовательно, и основой работы всей машины является один-единственный элемент, обладающий главным свойством — способностью находиться в двух хорошо различимых физических состояниях.

Вся электроника машины работает в двоичном коде. Или скажем иначе: машине удобно использовать только два вида знаков — электрический импульс и паузу, как их называют 1 и 0. При этом все сотни тысяч или миллионы элементов машины работают в простом и четком ключевом режиме: «пропускаю ток — не пропускаю», «зарядился — разрядился», «включено — выключено». И все это может иметь только одно толкование — 1 или 0.

Физикам известны десятки ключевых приборов, обладающих этим свойством; число их с каждым годом увеличивается, и на основе любого из них можно в принципе построить машину. Но только в принципе! Реальные компьютеры предъявляют к своему основному элементу целый набор весьма жестких требований. Это и высокие скорости переключения элемента из одного состояния в другое, и малые его размеры, и малая потребляемая им мощность, а также малая стоимость, надежность... Здесь большую услугу вычислительной технике могут оказать сверхпроводники, перспективы их использования в ЭВМ оцениваются весьма оптимистично. Многие ведущие специалисты в мире сейчас считают, что ЭВМ должны стать сверхпроводящими.

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ

Идея об использовании сверхпроводников в ЭВМ возникла давно. Еще в середине 50-х годов было предложено сверхпроводниковое устройство — криотрон, — в котором реализуются два состояния и которое может переключаться из одного состояния в другое.

Криотрон — устройство несложное. В своей первоначальной и простейшей форме он представлял собой танталовую проволоку — вентиль, — вокруг которой были намотаны витки из ниобия (рис. 64). И тантал, и ниобий — сверхпроводники, но критическая температура тантала — 4,4 К, а ниобия — 9,2 К. Поэтому в гелиевой ванне при температуре 4,2 К вентиль (и тем более обмотка) находится в сверхпроводящем состоянии и не оказывает сопротивления проходящему через нее току. При подаче в обмотку управления тока достаточной величины на поверхности вентиля появляется магнитное поле, превосходящее критическое, и танталовая проволока переходит в нормальное состояние с конечным сопротивлением. Управляющая обмотка, имеющая более высокую критическую температуру, остается при этом в сверхпроводящем состоянии.

Такое устройство, по существу, действует как реле, замкнутое в сверхпроводящем и разомкнутое в нормальном состоянии. Так можно записывать 0 или 1, т. е. создавать простейший элемент памяти. Из нескольких криот-

ронов, соединяя их в схеме, можно создавать устройства, отпирающие одни и запирающие другие каналы для прохождения тока, т. е. создавать считающие, логические и другие элементы ЭВМ.

Сказанное можно проиллюстрировать простым примером. Пусть ток распределяется по двум параллельным цепям, содержащим криотроны (рис. 65). Если обе ветви являются сверхпроводящими, то ток будет разветвляться по ним в соответствии с их индуктивностями. Если теперь криотрон  $K_1$  на короткое время перевести в нормальное состояние, то общий ток пойдет по правой цепи. Такое распределение тока будет стабильным до тех пор, пока, скажем, криотрон  $K_2$  не будет переведен в нормальное состояние управляющим импульсом, поданным на его катушку. Такой импульс перебрасывает ток в левую цепь.

С помощью криотронов  $K_3$  и  $K_4$  можно определять, в какой цепи течет сверхпроводящий ток, т. е. производить операцию считывания. Криотрон, управляемый током, текущим по данной ветви, находится в нормальном состоянии и при подаче на него импульса считывания даст сигнал в виде напряжения. Криотрон в другой цепи остается в сверхпроводящем состоянии.

Проволочный криотрон был прост по конструкции. Наряду с этим он отличался малой рассеиваемой тепловой мощностью при переходе в нормальное состояние. И все же для криоЭВМ проволочные криотроны оказались непригодными — они работали слишком медленно. В состязании с быстродействующими полупроводниковыми элементами проволочный криотрон проигрывает. И не потому, что «медлительна» сама сверхпроводимость: переход проволочки из одного состояния в другое происходит очень быстро. Быстродействие криотронного переключателя определяется его постоянной времени  $\tau = L/R$ , где  $L$  — индуктивность управляющей обмотки, а  $R$  — сопротивление вентили в нормальном состоянии. У проволочных криотронов  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-4}$  с — это явно недостаточно для их применения в современных машинах. Чтобы уменьшить постоянную времени  $\tau$ , необходимо предельно увеличить сопротивление  $R$  и уменьшить индуктивность.

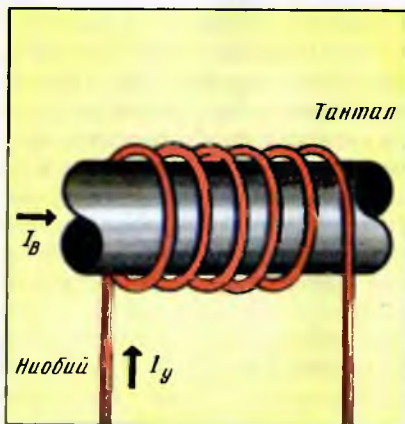


Рис. 64

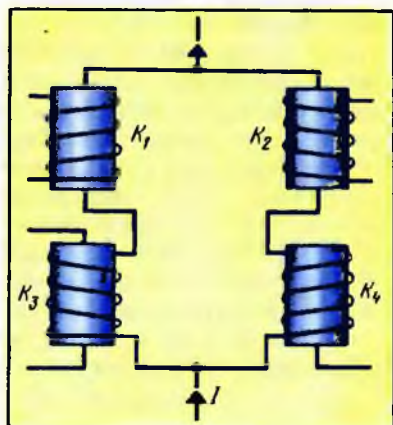


Рис. 65



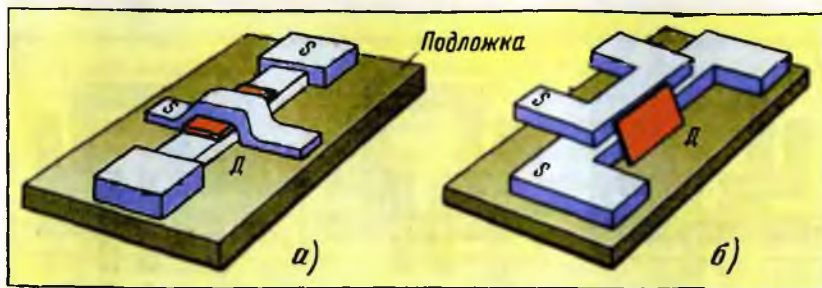


Рис. 66

Эту задачу можно решить, если вместо проволочек в криотроне использовать тонкие пленки, полученные напылением в вакууме. Такой пленочный криотрон показан на рисунке 66.

Вентиль здесь выполнен в виде тонкой пленки олова, нанесенной на подложку, а управляющим элементом служит свинцовая пленка, которая может располагаться либо перпендикулярно вентилью (поперечный криотрон, рис. 66,а), либо параллельно (продольный криотрон, рис. 66,б). Изменением тока через управляющую пленку можно переводить вентиль из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно, т. е. включать и выключать цепь. Обе пленки отделены друг от друга тонким слоем изолятора (обычно это окись кремния), имеют толщину порядка  $10^{-7}$  м, а значит, малую индуктивность и высокое сопротивление.

В дальнейшем конструкция пленочного криотрона была модернизирована введением между подложкой и вентильной пленкой свинцового экрана, который благодаря своему диамагнетизму в сверхпроводящем состоянии ограничивает объем, занимаемый магнитным полем. Это значительно уменьшает индуктивность криотрона и, следовательно, существенно увеличивает его быстродействие. Таким способом время переключения удалось снизить до  $10^{-7}$  с, сохранив при этом высокую плотность монтажа: на площади  $1 \text{ см}^2$  можно разместить до ста пленочных элементов.

Для записи и хранения информации и построения ячеек памяти используется замкнутый сверхпроводящий контур, в котором может быть наведен незатухающий ток. Наличию тока можно приписать информацию 1, отсутствию — 0. На рисунке 69 показана принципиальная схема одного из вариантов криотронной ячейки памяти. На свинцовой подложке 1, покрытой тонким слоем диэлектрика, нанесены оловянные пленки в виде петель 2, соединенные в группы цифровым проводом 3. На оловянную пленку через слой диэлектрика напыляются свинцовые пленки А и В.

При записи информации через цифровой провод пропускают ток (рис. 67,а). Одновременно по проводам А и В пропускают токи, которые в сумме создают магнитное поле, способное разрушить сверхпроводимость на участке оловянной петли, расположенной под ними. Поэтому ток течет только по верхней части петли. Это состояние сохраняется и после выключения тока в проводах А и В, хотя оловянная

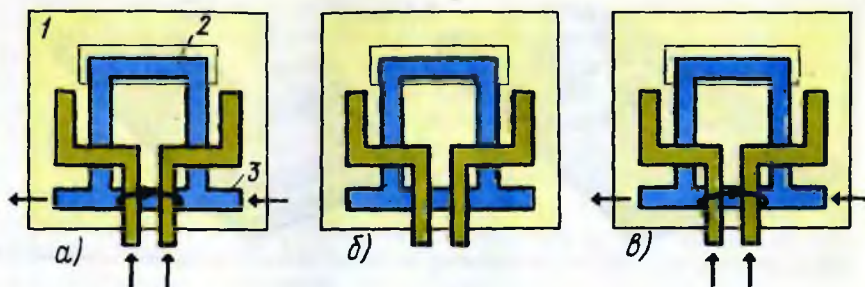


Рис. 67

пленка становится полностью сверхпроводящей. Если теперь через цифровой провод пропустить импульс тока, то в петле сформируется циркулирующий незатухающий ток, хранящий поданную информацию (рис. 67,б). Для считывания этой информации по проводам *A* и *B* пропускают суммарный ток, разрушающий сверхпроводимость на том участке оловянной петли, что и ранее. Это приводит к уничтожению тока в петле и введению в цифровом проводе смыслового импульса (рис. 69,в). Такая память обладает рядом замечательных свойств и позволяет конструировать запоминающее устройство емкостью до  $10^9$  ячеек памяти с быстродействием порядка  $10^7$  операций в секунду.

И все же превзойти параметры полупроводниковых схем сверхпроводникам долго не удавалось. Оказалось, что время переключения криотронов не может быть меньше  $10^{-8}$  с, а для современных ЭВМ даже  $10^{-9}$  с — миллиардная доля секунды — не такая уж малая величина. В то же время сделать ЭВМ на сверхпроводящих криотронах оказалось гораздо труднее, чем на полупроводниках. И охлаждать ее надо было до очень низких температур. Поэтому сверхпроводящие криотроны на какое-то время были оставлены, и казалось, что это тупиковая ветвь в эволюции ЭВМ. Лишь с освоением эффектов слабой сверхпроводимости надежды на создание сверхЭВМ вновь возродились.

## СВЕРХ-ЭВМ НА ТУННЕЛЬНЫХ КОНТАКТАХ

Как часто это бывает, новый физический эффект открыл новые технические возможности. Обратив внимание на характеристики джозефсоновских туннельных контактов, создатели ЭВМ сразу нащупали правильный путь.

Вот цепочка их рассуждений и действий. Если ток, проходящий через джозефсоновский туннельный контакт, не превышает определенной величины, то вся система должна находиться в сверхпроводящем состоянии и обладать нулевым сопротивлением. С помощью внешнего магнитного поля или тока такой контакт можно подвести близко к переходу в нормальное состояние, и тогда для перехода нужен совсем небольшой управляющий

импульс тока. На контакте сразу же возникает разность потенциалов, что означает появление у него определенного сопротивления. Таким образом, туннельный контакт может находиться в двух состояниях, определяемый наличием и отсутствием напряжения на контакте. На этом принципе могут быть построены туннельные джозефсоновские криотроны.

Так как переход от нулевого сопротивления к конечному не связан с разрушением сверхпроводящего состояния материалов, то скорость переключения туннельных криотронов оказывается значительно более высокой, чем у обычных сверхпроводящих криотронов. При размерах контактов порядка десятка микрон время срабатывания элемента оказывается порядка  $10^{-10}$ — $10^{-11}$  с.

Но это еще не все. Энергия, выделяемая при каждом переключении, составляет всего  $10^{-17}$  Дж (предельно возможная величина еще на два порядка меньше). Это означает, что можно значительно увеличить плотность размещения таких элементов. Даже очень большая схема, собранная из миллиардов туннельных элементов, будет иметь очень небольшую мощность тепловыделения; устраняется, таким образом, главное препятствие на пути к микроминиатюризации быстродействующих ЭВМ.

Элемент памяти на туннельных криотронах схематически показан на рисунке 68. Система состоит из двух джозефсоновских туннельных контактов  $K_1$  и  $K_2$  и управляющего проводника над ними.

Информация записывается в виде тока в контуре  $C_1C_2$ , циркулирующего либо по часовой стрелке (состояние 1), либо против (состояние 0).

Рассмотрим работу этого элемента. Пусть требуется записать 1 в ячейку, находящуюся первоначально в состоянии 0. Процесс записи начинается с пропускания тока управления  $I_y$ . Этот ток разветвляется так, что через контакт  $C_1$  теперь течет ток  $I_1 = \frac{I_y}{2} I_n$ , а через контакт  $C_2$  — ток  $I_2 = \frac{I_y}{2} - I_n$ . Затем подается ток  $I_x$ ; он под-

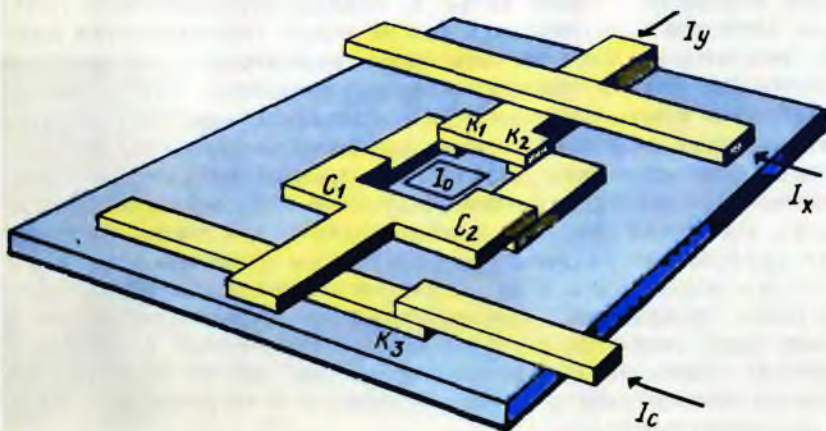


Рис. 68

бирается таким, чтобы при совпадении  $I_x$  и  $I_0$  клапан закрылся, т. е. перешел в нормальное состояние. Тогда ток через контакт  $C_2$  будет возрастать до тех пор, пока ток через контакт  $K_1$  не упадет до некоторой малой величины, при которой контакт  $K_1$  снова переключится на туннелирование. Теперь уже ток через контакт  $C_2$  будет больше, чем через контакт  $C_1$ , и при выключении тока в контуре возбуждается циркулирующий ток по часовой стрелке, что соответствует 1. При этом магнитный поток в контуре остается неизменным.

Считывание информации производится с помощью контакта  $K_3$ . Для этого включается ток  $I_y$  и считывающий ток  $I_c$ . Если ток  $I_{c2} = \frac{I_y}{2} + I_0$ , то контакт  $K_3$  переходит в состояние с конечным падением напряжения, выдавая при этом необходимую информацию. Если же ток циркулирует против часовой стрелки, то в контакте  $C_2$  ток  $I_{c2} = \frac{I_y}{2} - I_0$  и переключения контакта  $K_3$  не происходит.

Для записи нуля нужно снова подать ток  $I_y$  и изменить направление тока  $I_0$ . Для хранения информации очень удобно использовать рассмотренное выше явление квантования магнитного потока. Такой способ хранения информации основан на том, что в контакт могут проникать отдельные кванты магнитного потока. Оказалось возможным вводить квант магнитного потока в джозефсоновский туннельный контакт и удалять его из контакта, фиксируя при этом изменения состояния контакта. Носителем информации в этом случае является квант магнитного потока, заключенный в самом контакте. Квант потока можно вводить также в сверхпроводящее кольцо малых размеров с джозефсоновским туннельным контактом.

Джозефсоновские схемы можно изготавливать по той же технологии, что и полупроводниковые интегральные схемы. На основе БИС со степенью интеграции  $10^5 \dots 10^6$  криотронов на плате можно создать работающие блоки машины, эквивалентной по структуре наиболее мощным ЭВМ. Производительность такой машины может составлять более  $10^{10}$  операций в секунду, а рассеиваемая мощность — менее ватта. С такими рекордсменами полупроводниковые элементы конкурировать уже не могут. Преимущества джозефсоновских элементов окупают затраты на охлаждение, трудности конструирования и многие другие недостатки сверхпроводящих ЭВМ. Сейчас во всем мире ведутся интенсивные работы по созданию сверхЭВМ. И хотя на этом пути еще очень много нерешенных проблем, специалисты считают, что день, когда заработает первая ЭВМ на сверхпроводниках, не за горами.

Вот и закончилось наше путешествие в холодный мир сверхпроводников. Мы начали с выяснения природы сверхпроводимости, и логика рассказа шаг за шагом привела нас к величайшим открытиям современности, научным идеям, послужившим основой для создания многих чудес века.

На наших глазах фундаментальные исследования по сверхпроводимости привели к рождению новой области техники — прикладной сверхпроводимости, ставшей одним из решающих факторов научно-технического прогресса. Такова логика физических исследований, и сверхпроводимость еще раз это продемонстрировала.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . . 5

## ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ЭТА СТРАННАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

**Глава 1. Чудеса вблизи абсолютного нуля** . . . . . 9

У начала пути (10). Лейден, 1911 год. Открытие сверхпроводимости (12).



**Глава 2. Полвека загадок и открытий** . . . . . 16

Когда исчезает сопротивление (16). Сверхпроводник в магнитном поле (18). Идеальный проводник или идеальный диамагнетик? (20) Уравнение Лондонов. Глубина проникновения (22). О фазовых переходах (24). Два типа электронов (26). Еще раз об эффекте Мейснера (27). Прерывное в непрерывном (27). Еще один барьер — критический ток (30). Абрикосовские вихри (33). ... И яснее вырисовывается картина (35).



**Глава 3. Путь к микротeorии...** . . . . . 36

Сверхпроводимость — явление квантовое (37). Живой кристалл (37). Не маятник, а волны (38). Звуковой квант — фонон (40). Электронный газ в металле (41). Электроны движутся в металле (41). «Вакуум» в кристалле (43). О двух статистиках (44). Энергетическая структура (45). Проводники, диэлектрики и полупроводники (47).



**Глава 4. Проникновение в сущность** . . . . . 50

Изотопический эффект (50). Теория БКШ (51). Когда электроны притягиваются друг к другу (52). Электроны объединяются в пары (53). Движение электронных пар в металле (54). Конечные температуры (56). Энергетическая щель (56). Бесщелевая сверхпроводимость (58).





**Глава 5. Туннели для электронов . . . . .**

60

Электрон подходит к барьеру (61). Туннелирование между двумя нормальными металлами (63). Туннелирование между нормальным металлом и сверхпроводником (64). Туннелирование между двумя сверхпроводниками (65). Туннелируют электронные пары (68). Эффекты Джозефсона (70).

**ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ХОЛОДНЫЙ МИР СВЕРХПРОВОДНИКОВ**



**Глава 6. Вниз по шкале температур . . . . .**

77

Сжижение газов (77). Квантовая жидкость (80). Техника гелиевых температур (82). Глубокий холод (84).



**Глава 7. Сверхпроводящие материалы . . . . .**

87

Явное и сокровенное (87). Сплавы и соединения (89). С помощью пиннинга (91). Технические сверхпроводники (92).



**Глава 8. На пути к высокотемпературной сверхпроводимости . . . . .**

94

На чем основаны надежды (94). В поисках высокотемпературных сверхпроводников (98). Новые сверхпроводники (100).

**ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ПРОФЕССИИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**



**Глава 9. Сверхпроводящие магниты . . . . .**

105

Ключ к магниту (106). Как получают сильные магнитные поля (106). Сверхпроводящие соленоиды (107). Сверхмагниты: проблемы конструирования (109).



**Глава 10. Сверхпроводящие магниты в физике . . . . .**

112



**Глава 11. Сверхпроводимость и энергетика . . . . .**

116

Термоядерная энергетика (117). МГД-энергетика (119). Сверхпроводящие генераторы (120). Склады энергии (121). Кабели для передачи энергии (122). Размышления об экологии (125).



**Глава 12. Устройства необычные и даже «не осуществимые» . . . . . 126**  
Магнитный насос (126). Генератор постоянного тока без щеток (128). Трансформатор постоянного тока (130)



**Глава 13. Магнитопланы и магнитоходы . . . . . 131**  
Магнитные подвесы и подшипники (131). Поезда без колес (133).  
Корабли без винта (135).



**Глава 14. Сверхпроводящая электроника . . . . . 138**  
Сверхпроводящие измерители (139). Сверхпроводниковые приемники излучения (139). Сверхпроводящие резонаторы (141). Линейные ускорители заряженных частиц (142). Слабосвязанные сверхпроводники (143). С помощью туннельных контактов (145). Квантовый магнитометр (147).



**Глава 15. ЭВМ на сверхпроводниках . . . . . 150**  
Это лежит в основе (150). Сверхпроводниковые переключатели и элементы памяти (151). Сверх-ЭВМ на туннельных контактах (154).

Учебное издание

**Мнеян Мирон Георгиевич**

**СВЕРХПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ**

Зав. редакцией

**В. А. ОБМЕНИНА**

Редактор

**О. В. СЕРЫШЕВА**

Младшие редакторы

**О. В. АГАПОВА, Л. И. ЗАСЕДАТЕЛЕВА**

Художники

**В. А. КРЮЧКОВ, С. Г. БЕССОНОВ, А. В. ЕРМАКОВ**

Художественный редактор

**В. М. ПРОКОФЬЕВ**

Технический редактор

**Г. В. СУБОЧЕВА**

Корректор

**Н. С. СОБОЛЕВА**

ИБ № 11417

Сдано в набор 04.05.90. Подписано к печати 12.05.91. Формат 70×90<sup>1/16</sup>. Бум. офсетная № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,70 + форз. 0,29. Усл. кр.-отт. 48,56. Уч.-изд. л. 11,16 + форз. 0,48. Тираж 92 000 экз. Заказ 2519. Цена 1 р. 90 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и массовой информации РСФСР. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Смоленский полиграфкомбинат Министерства печати и массовой информации РСФСР. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.