

Сверхпроводящие магниты

Доктор физико-математических наук
Л. Г. АСЛАМАЗОВ

Сильные магнитные поля можно получать, пропуская через катушку сильный ток. Чем больший ток течет через катушку, тем большее магнитное поле он создает. Но если катушка обладает электрическим сопротивлением, то в ней выделяется тепло. Приходится тратить огромную энергию на поддержание тока, возникают серьезные проблемы, связанные с отводом тепла (иначе катушка может расплавиться). Так, в 1937 году впервые было получено магнитное поле с индукцией 10 Тл. Но удерживать это поле удавалось только ночью, когда другие потребители электростанции, подающей ток в обмотку, были отключены. Выделявшееся тепло отводилось проточной водой, и при этом каждую секунду 5 литров воды доводились до кипения.

Именно это и ограничивает возможности получения сильных магнитных полей в обычных соленоидах.

Идея использования сверхпроводимости для создания сильных магнитных полей возникла сразу после ее открытия. Казалось бы, все, что требуется, — это намотать из сверхпроводящей проволоки катушку, замкнуть ее концы и пустить по такому контуру достаточно сильный ток. Так как электрическое сопротивление катушки равно нулю, то выделения тепла не происходит. И хотя охлаждение соленоида до температур жидкого гелия, при которых наступает сверхпроводимость, создает определенные трудности, преимущества окупили бы недостатки, если бы... магнитное поле само не разрушало сверхпроводимость.

Открытие сверхпроводимости

На рисунке 1 показана схема опыта Камерлинг-Оннеса, который был сделан в 1911 году в Лейдене. Голландские ученые изготовили катушку из свинца, подсоединили ее к источнику

ЭДС и, поместив катушку в жидкий гелий, охладили ее до температуры кипения гелия (4,2 К). При этом электрическое сопротивление свинца исчезло — он перешел в сверхпроводящее состояние. Затем изменили положение ключей и замкнули катушку накоротко — по ней начал циркулировать незатухающий сверхпроводящий ток.

Этот ток создает магнитное поле, индукция которого пропорциональна силе тока. Казалось бы, чем сильнее ток в катушке, тем большее магнитное поле можно получить таким образом. Результат, однако, оказался разочаровывающим: при индукции поля в несколько сотых долей тесла соленоид переходил в нормальное состояние (у него появлялось сопротивление). Пытались делать катушки из других сверхпроводников, но и в них разрушение сверхпроводимости происходило при сравнительно малых магнитных полях. В чем же дело?

Эффект Мейснера

Разгадку такого «неудобного» поведения сверхпроводников нашли в 1933 году в Берлине в лаборатории В. Мейснера. Оказалось, что сверхпроводник обладает свойством полностью вытеснять из себя магнитное поле; в его толще индукция магнитного поля равна нулю.

Представим себе, что металлический цилиндр (кусочек проволоки) охладили до низкой температуры и перевели в

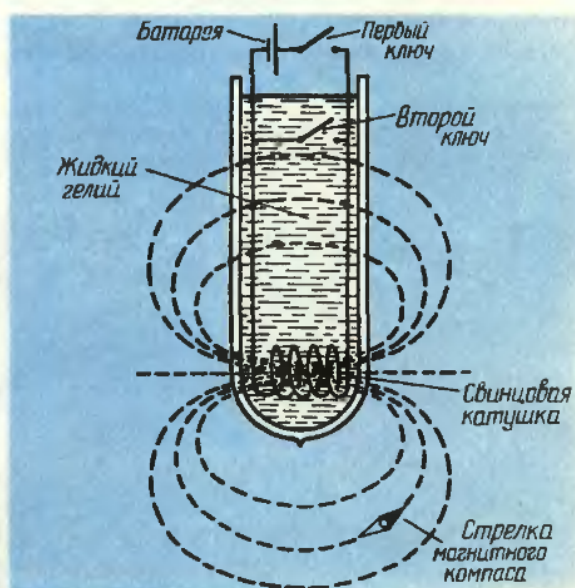


Рис. 1.

сверхпроводящее состояние. Затем включили магнитное поле с индукцией $\vec{B}_{\text{внеш}}$. По закону электромагнитной индукции на поверхности цилиндра появятся круговые токи (рисунок 2), которые создадут в цилиндре магнитное поле с индукцией $\vec{B}_{\text{ток}}$, равной по величине и противоположной по направлению индукции внешнего поля. Эти токи — сверхпроводящие и затухать не будут. Поэтому в толще сверхпроводника суммарная индукция равна нулю: $\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{ток}} = 0$. Линии индукции магнитного поля в сверхпроводник не проникают.

Ну, а что, если изменить последовательность операций — сначала поместить металл во внешнее магнитное поле, а затем охладить его до сверхпроводящего состояния. Казалось бы, индукция магнитного поля при этом не меняется и нет причин для возникновения экранирующих поверхностных токов. Именно так и думал Мейснер, когда проверял расчеты Лауэ, относящиеся к первому способу проведения эксперимента.*) Думать-то думал, но все-таки решил проверить. Результат измененного эксперимента получился удивительный. Оказалось, что и в этом случае магнитное поле полностью вытесняется из сверхпроводника, не проникает в него.

Это явление назвали эффектом Мейснера.

Теперь ясно, почему магнитное поле разрушает сверхпроводимость. Ведь на возбуждение поверхностных токов тратится определенная энергия. В этом смысле сверхпроводящее состояние ме-

нее выгодно, чем нормальное состояние, когда магнитное поле проникает в металл и экранирующих поверхностных токов нет. Чем больше индукция внешнего поля, тем более сильный ток должен течь по поверхности, чтобы обеспечить экранировку. При некотором значении индукции магнитного поля сверхпроводимость обязательно разрушается, и металл переходит в нормальное состояние. Поле, при котором происходит разрушение сверхпроводимости, называется критическим полем сверхпроводника. Важно понимать, что для разрушения сверхпроводимости не обязательно внешнее магнитное поле. Ток, текущий по сверхпроводнику, сам создает магнитное поле. Когда при определенном значении тока индукция этого поля достигает значения, соответствующего критическому полю, сверхпроводимость разрушается.

Величина критического поля растет с уменьшением температуры, но даже вблизи абсолютного нуля критическое поле у чистых сверхпроводящих металлов невелико (см. график на рисунке 3). В лучших случаях оно составляет всего десятые доли тесла. Так что, казалось бы, нечего и думать о создании сильных магнитных полей с помощью сверхпроводников.

Но дальнейшее исследование сверхпроводимости показало, что выход все-таки есть. Было обнаружено, что имеется целая группа сверхпроводников, которые и в очень сильных магнитных полях сохраняют сверхпроводимость, правда, в несколько ослабленном виде.

Абрикосовские вихри

В 1957 году советский физик А. А. Абрикосов теоретически показал, что в сплавах разрушить сверхпроводимость

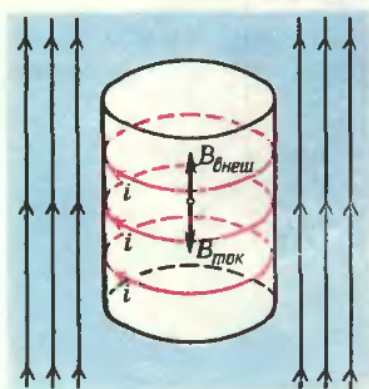


Рис. 2.

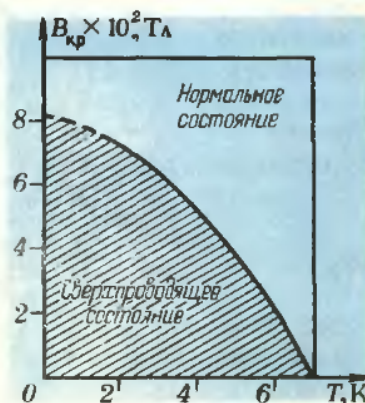


Рис. 3.

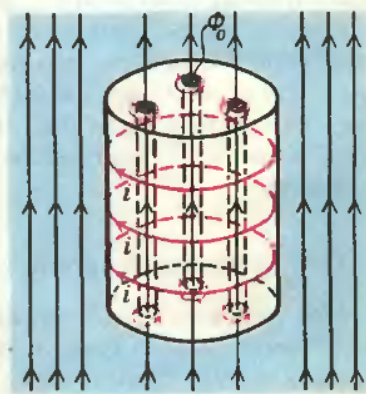


Рис. 4.

*) Об истории открытия эффекта Мейснера рассказывалось в «Кванте» № 10 за прошлый год (с. 16).

магнитным полем не так-то просто. Так же как у чистых сверхпроводников, при некотором значении индукции магнитное поле начинает проникать внутрь сверхпроводника. Но в сплавах магнитное поле обычно не сразу заполняет весь объем сверхпроводника. В толще его вначале образуются лишь отдельные сгустки линий индукции магнитного поля (рисунок 4). В каждом таком сгустке содержится строго определенная порция магнитного потока $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб. Величина Φ_0 называется квантом магнитного потока.

Чем больше внешнее магнитное поле, тем больше таких сгустков, а следовательно, и квантов магнитного потока проникает в сверхпроводник. Поэтому магнитный поток в сверхпроводнике меняется не непрерывно, а скачками, дискретно. Обычно дискретность физических величин проявляется в микромире (например, квантуется энергия электронов в атоме). Здесь мы сталкиваемся с удивительным явлением — законы квантовой механики «работают» в макроскопических масштабах.

Каждый сгусток линий индукции магнитного поля в сверхпроводнике окружен кольцевыми незатухающими токами (см. рисунок 4), которые напоминают вихри в жидкости или газе. Вот почему такие сгустки линий, окруженные сверхпроводящими токами, называют абрикосовскими вихрями. Внутри каждого вихря сверхпроводимость, разумеется, разрушена. Но в пространстве между вихрями она сохраняется! Только при очень сильных полях, когда вихрей становится так много, что они начинают перекрываться, наступает полное разрушение сверхпроводимости.

Такая необычная картина разрушения сверхпроводимости магнитным полем в сплавах впервые была открыта

«на кончике пера». Однако современная экспериментальная техника позволяет наблюдать абрикосовские вихри непосредственно. Для этого на поверхность сверхпроводника (например, поперечное сечение цилиндра) наносят тончайший магнитный порошок. Частицы порошка скапливаются в тех областях, куда проникло магнитное поле. Размеры каждой области невелики и обычно составляют доли микрона. Если посмотреть на поверхность в электронный микроскоп, то видны темные пятна.

На рисунке 5 показана фотография структуры абрикосовских вихрей, полученная таким способом. Видно, что вихри расположены периодически и образуют решетку, аналогичную кристаллической решетке. Вихревая решетка треугольная (ее можно составить из повторяющихся правильных треугольников).

Итак, в отличие от чистых металлов сплавы имеют не одно, а два критических поля: нижнее критическое поле, при котором первый вихрь проникает в сверхпроводник, и верхнее критическое поле, при котором происходит полное разрушение сверхпроводимости. В промежутке между этими значениями полей сверхпроводник пронизан вихревыми линиями и находится в особом смешанном состоянии. Сверхпроводники с такими свойствами теперь называют сверхпроводниками второго рода, в отличие от сверхпроводников первого рода, в которых разрушение сверхпроводимости в магнитном поле происходит сразу, скачком.

В 50-х годах началась настоящая охота за сверхпроводящими материалами, обладающими высокими критическими полями и температурами. Какими только способами их ни получали! И дуговой сваркой, и быстрым охлаждением, и напылением на горячую подложку. Были открыты, например, сплавы Nb_3Sn и Nb_3Al , имеющие критическую температуру (температуру перехода в сверхпроводящее состояние) 18 К и верхние критические поля более 10 Тл, и многие другие сверхпроводящие соединения с рекордными критическими параметрами.

Казалось бы, проблема создания сверхпроводящих магнитов тем самым решена. Но тут природа поставила на пути исследователей еще одну преграду. Ведь для сверхпроводящего со-

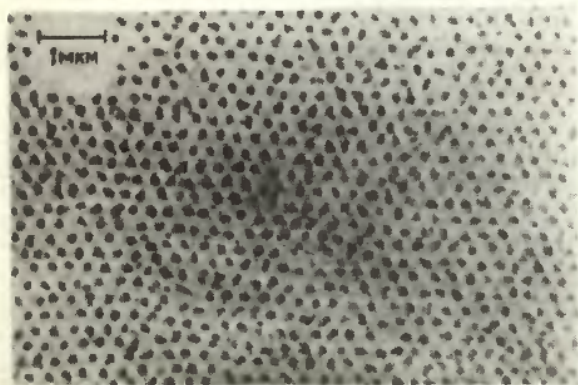


Рис. 5.

леноида необходима проволока, которая выдерживала бы не только сильное магнитное поле, но и сильный электрический ток. А это, оказывается, не одно и то же.

Что такое пиннинг?

Известно, что на проводник с током в магнитном поле действует сила. А куда приложена сила противодействия, возникающая по третьему закону Ньютона? Если, например, магнитное поле создается другим проводником с током, то на него действует равная по величине и противоположная по направлению сила (силы взаимодействия между проводниками с током определяются законом Ампера).

В нашем случае ситуация более сложная.

Когда сверхпроводник находится в смешанном состоянии и по нему течет ток, то в тех областях, где имеется магнитное поле (сердцевины вихрей), 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!

Сила, действующая на ток в магнитном поле, перпендикулярна индукции магнитного поля и направлению проводника. Сила, действующая со стороны тока на абрикосовский вихрь, тоже перпендикулярна индукции магнитного поля и направлению тока. Если, например, в сверхпроводнике в смешанном состоянии, показанном на рисунке 5, создать ток, протекающий слева направо, то абрикосовские вихри под действием тока начнут двигаться снизу вверх или сверху вниз (в зависимости от направления индукции магнитного поля). Но движение абрикосовского вихря сквозь сверхпроводник — это перемещение нормальной, не сверхпроводящей, сердцевины. 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 и использовать такие сверхпроводники для создания соленоидов нельзя.

В чем же выход? Надо помешать вихрям двигаться, закрепить их на месте.

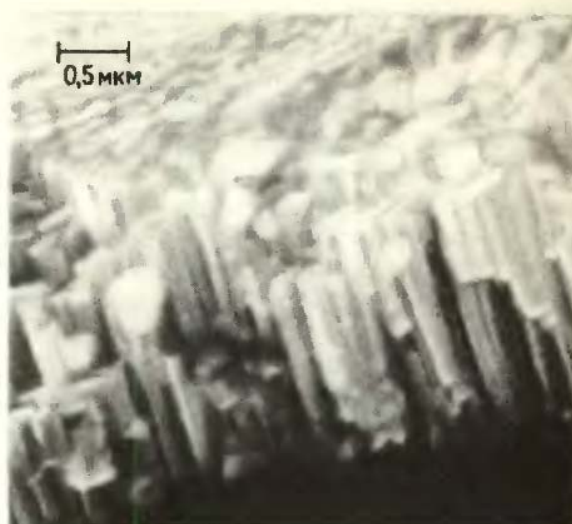


Рис. 6.

Сделать это, оказывается, можно. Надо только «испортить» сверхпроводник, создать в нем какие-то дефекты. Дефекты обычно возникают сами по себе в результате механической или термической обработки материала. На рисунке 6, например, показана электронно-микроскопическая фотография пленки нитрида ниобия (критическая температура которой 15 К), полученной напылением металла на стеклянную пластинку. Ясно видна зернистая (столбчатая) структура материала. Перескочить через границу зерна вихрю довольно сложно. Вот почему до определенного значения тока (его называют критическим током) вихри остаются неподвижными. Электрическое сопротивление в таком случае равно нулю.

Это явление называют пиннингом — от английского слова pinning, что в переводе на русский язык означает прикалывание.

Благодаря пиннингу можно получать 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, то есть силы тока, приходящейся на единицу площади сечения) во многом зависит от способа приготовления, методов обработки материала. Сейчас разработана технология, позволяющая получать сверхпроводящие материалы, имеющие высокие значения всех критических параметров. Например, на основе сплава ниобия с оловом можно получить материал с плотностью критического тока в сотни

тысяч ампер на квадратный сантиметр, верхним критическим полем 25 Тл и критической температурой 18 К.

Но это еще не все. Ведь важны и механические свойства материала — из него предстоит сделать катушку. Сам по себе сплав ниобия с оловом хрупкий, и такую проволоку изгибать нельзя. Поэтому сверхпроводящие соленоиды изготавливали следующим образом: порошок из ниобия и олова набивали в ниобиевую трубку. Затем трубку вытягивали в проволоку, наматывали катушку и нагревали. В результате получался готовый соленоид из сплава Nb_3Sn .

В промышленности используются более технологичные материалы, например, сплав ниобия с титаном $NbTi$, который обладает достаточной пластичностью. На основе этого сплава создают так называемые композиционные сверхпроводники.

В бруске меди просверливается множество дыр и туда вводят стержни сверхпроводника. Затем брусок вытягивают в длинную проволоку. Проволоку разрезают на куски и снова вводят в медный брусок. Опять вытягивают проволоку, разрезают на куски и т. д. В результате получается кабель, содержащий до миллиона сверхпроводящих жил, из которого и наматывают катушки.

Важное преимущество кабелей состоит в том, что сверхпроводящий ток распределяется в них по всем жилам. Для сверхпроводника даже медь является хорошим изолятором — при параллельном соединении медного и сверхпроводящего проводников весь ток течет по сверхпроводнику, обладающему нулевым сопротивлением. Есть и еще одно преимущество. Представим себе, что в какой-то жиле сверхпроводимость случайно разрушилась. Тогда выделяется тепло, и важно отвести его, для того чтобы предотвратить переход всего кабеля в нормальное состояние. Медь, которая является хорошим теплопроводником, успешно справляется и с этой задачей, осуществляя термическую стабилизацию. Кроме того, медь обеспечивает хорошие механические свойства кабелей.*)

*) В «Кванте» № 9 за 1982 год на обложке были показаны образцы многожильных сверхпроводящих кабелей.

Где применяют сверхпроводящие соленоиды

«Профессии» сверхпроводящих магнитов весьма разнообразны. Они играют важную роль в физике высоких энергий, помогают исследовать твердые тела, применяются в электротехнике и даже на транспорте. О проектах поездов на магнитной подушке в наше время, наверное, слышали все школьники. Сверхпроводящие соленоиды, установленные в вагоне, создают мощное магнитное поле, которое при движении поезда наводит индукционные токи в специальных рельсах. Согласно правилу Ленца магнитное поле этих токов направлено так, чтобы препятствовать приближению соленоида к рельсу, и поезд... повисает над полотном. В Японии уже создана семикилометровая экспериментальная линия, на которой поезд весом в 10 тонн мчится со скоростью более 500 (!) километров в час. В нашей стране разработан технический проект транспортной системы на магнитной подушке для города Алма-Ата.

В электротехнике использование сверхпроводящих магнитов становится целесообразным при создании электрических двигателей и генераторов гигантской мощности в сотни и более мегаватт. Сверхпроводящие обмотки в статоре создают сильное постоянное магнитное поле, в котором вращается ротор из нормального металла. При этом достигается значительное уменьшение размеров и веса установки. Такие двигатели мощностью в несколько мегаватт уже созданы и разрабатываются проекты более мощных машин. Еще большие преимущества дает применение сверхпроводящей обмотки ротора, но при реализации этой идеи возникает много технических проблем.

Мы знаем, что магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы (токи) 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. Именно такой принцип магнитного «удержания» частиц применяется в ускорителях, пузырьковых камерах, установках управляемого термоядерного синтеза. Преимущества использо-

вания для этих целей сверхпроводящих магнитов, создающих сильные магнитные поля без затрат огромных энергий, очевидны. В нашей стране уже действует первая в мире сверхпроводящая система для установки термоядерного синтеза «Токамак-7» и разработана установка «Токамак-15», в которой будет накапливаться магнитная энергия в 600 миллионов джоулей. Создание устройств следующих поколений, рассчитанных на более высокие энергии, без использования сверхпроводимости просто невозможно.

При исследовании твердых тел, молекул и атомов, ядер необходимо создавать сильные магнитные поля в малых объемах, а также очень однородные магнитные поля. Сверхпроводящие магниты в таких случаях 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.

Энергетика будущего — это не только новые источники энергии. Необходимо разработать новые эффективные способы хранения и передачи электро-

энергии. Сверхпроводники и здесь предлагают свои услуги. Учеными Висконсинского университета (США) разработан проект системы хранения электроэнергии. Гигантская сверхпроводящая катушка диаметром более 100 метров будет установлена в специальном тоннеле, пробитом в горах. В нем с помощью холодильных установок с жидким гелием будет поддерживаться температура, близкая к абсолютному нулю. Незатухающий сверхпроводящий ток в такой катушке запасет гигантскую энергию в $4 \cdot 10^{11}$ Дж. Установку планируется создать к 1987 году.

А передача энергии без потерь по сверхпроводящим кабелям? Пока что можно только мечтать о линиях электропередач, которые, «купаясь» в жидком гелии, переносили бы электричество без потерь на огромные расстояния. Но сверхпроводимость ведь еще не сказала последнего слова. Вполне возможно, что появятся материалы, которые будут становиться сверхпроводниками при температурах жидкого азота. И тогда сразу все изменится. Фантазия станет реальностью. Хочется верить, что читателям «Кванта» предстоит это увидеть.

Традиционный осенний праздник юных математиков

В начале ноября в гостеприимной столице Аджарии — г. Батуми в очередной раз соберутся юные любители математики. Традиционный батумский праздник — давний друг и почти ровесник «Кванта»: в прошлом году он отметил свое 15-летие. Этот небольшой юбилей был отмечен рекордным числом делегаций (14), участников (более 200), докладов на конференции (43). Тем больше заслуга организаторов праздника, сумевших четко продумать и осуществить всю его весьма насыщенную программу. Среди них нужно отметить работников Министерства просвещения Аджарской АССР (Л. А. Чантурая и В. М. Цулукидзе), Батумского горсовета (А. В. Готишвили), общества «Знание» (Д. У. Чхеидзе), Областного совета профсоюзов (Ш. М. Окropicидзе) и, конечно, главного инициатора и вдохновителя этого замечательного слета юных математиков — заслуженную учительницу республики Медею Иларионовну Жгенти.

За 15 лет батумцы выработали прочные традиции проведения своего праздника и многое из их опыта безусловно может быть использовано в других городах, не только на конференциях, собирающих участников из разных мест, но и на встречах нескольких школ одного города. Это касается и собственно конференции, занимающей центральное место, то есть докладов школьников и их обсуждения (с участием членов жюри — математиков и педагогов), и вечера занимательной математики, и конкурса математических стенгазет и, конечно, любимого всеми веселого математического КВНа (ведущий которого, по традиции, главный «затейник» нашего журнала А. П. Савин).

Истинно праздничному настроению участников в прошлом году весьма способствовала великолепная солнечная погода, не совсем обычная для этого времени в Батуми. Она украсила экскурсии в знаменитый ботанический сад и дельфинарий, ноябрьскую демонстрацию, на которой гостям особенно понравились живые картины, посвященные 200-летию Георгиевского трактата — союза между Грузией и Россией, прогулки по приморскому бульвару.

(Окончание см. на с. 28)