

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

538+537 312.62

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ*)

Дж. Кюнцлер

Сверхпроводники открыл Камерлинг-Оннес в 1911 г. Сразу же после этого было высказано предположение, что их можно использовать для возбуждения интенсивных магнитных полей при сравнительно малой затрате энергии. Практические трудности, в частности тот факт, что первые сверхпроводники теряли свои сверхпроводящие свойства в сравнительно слабых магнитных полях, привели к тому, что в то время не был достигнут какой-либо существенный прогресс. Однако совсем недавно были открыты сверхпроводники с иными свойствами, что позволило создать сверхпроводящие магниты с полями порядка 100 кгс.

Теоретически, при простом увеличении тока через соленоид можно получить электромагнит для возбуждения магнитного поля любой желаемой амплитуды. Фактически такой стандартный путь приводит к очень большим практическим трудностям даже при возбуждении полей меньше 100 кгс. Эти трудности возникают главным образом в связи с проблемой подвода большого количества энергии и в связи с диссипацией (пропорциональной квадрату силы тока) огромного количества тепла в обмотке, создающей магнитное поле. Поэтому никогда не остывал интерес к возможности использовать сверхпроводники в качестве обмотки электромагнитов, поскольку в этом идеальном случае потери на тепло (i^2R) равнялись бы нулю. Ранние попытки такого рода оказались безуспешными, так как примененные тогда материалы теряли сверхпроводимость в сравнительно слабых магнитных полях. Однако в 1961 г. были открыты сверхпроводящие сплавы, которые уже не обладали этим недостатком. С этого времени начался быстрый прогресс.

Легче всего оценить принципы, на основе которых создаются сверхпроводящие магниты, и практическую их пригодность, если кратко рассмотреть ограничения, свойственные большим постоянным магнитам и электромагнитам.

ОБЫЧНЫЕ МАГНИТЫ С БОЛЬШИМИ ПОЛЯМИ

Даже лучшие проводники, например медь, в обычных условиях имеют такое большое сопротивление, что создание с их помощью больших магнитных полей — порядка 100 кгс — чрезвычайно трудное и дорогостоящее дело.

*) J. E. K u n z l e r, Superconducting Magnets, Endeavour 23, 115 (1964).
Перевод В. В. Шмидта.

Магнитные поля в несколько килогаусс в объеме нескольких десятков кубических сантиметров уже десятки лет получают с помощью постоянных магнитов. Так, хороший подковообразный магнит создает магнитное поле напряженностью около 1 кгс. Это поле возникает в результате упорядоченного расположения части магнитных доменов в железном сплаве. Поля до 20—30 кгс в сравнительно малых объемах могут быть достигнуты в электромагнитах, если медную проволоку намотать на железный сердечник. При этом относительно слабое магнитное поле, возникающее при пропускании тока через обмотку, приводит к упорядоченному расположению магнитных доменов железа параллельно этому полю, и таким образом создается значительно большее полное магнитное поле. Верхний предел для полей, создаваемых электромагнитами с железным сердечником, определяется величиной насыщения намагничивания материала сердечника, когда все домены ориентированы в одну сторону. В наиболее благоприятных для данных материалов случаях эта величина достигает около 30 кгс.

Для получения магнитных полей больше ~ 30 кгс приходится использовать «грубую силу». В случае бесконечно длинного пустого соленоида напряженность магнитного поля в гауссах равна

$$H = \frac{4\pi ni}{10}, \quad (1)$$

где n — число витков обмотки на 1 см длины соленоида, i — ток в обмотке соленоида в а. Если длина соленоида по крайней мере равна его диаметру, выражение (1) с ошибкой, не превышающей 10%, может быть записано в виде

$$H \approx ni. \quad (2)$$

Можно показать, что (2) эквивалентно

$$H \approx kjt, \quad (3)$$

где k — доля объема обмотки, заполненная проводником (в идеальном случае $k = 1$), j — плотность тока в а/см², t — толщина обмотки в см.

Можно ожидать, что простым увеличением тока можно достичь любого желаемого значения поля. В известной степени это так, но необходимая для этого мощность быстро возрастает, быстрее, чем квадрат напряженности поля. Это связано с тем, что задача удаления выделившегося тепла и необходимости оптимального конструктивного решения вообще приводят к требованию увеличения также и физических размеров магнита, а следовательно, и электрического сопротивления. С этим приходится серьезно считаться даже и до того, как поле достигнет 100 кгс. Например, на среднюю часть обмотки соленоида действует радиальная сила, которая возникает из-за «магнитного давления» и пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля. При 100 кгс эта величина составит около 400 кГ/см². По-видимому, существуют всего одна-две дюжины магнитов с обмотками из нормальных проводников, способных создавать поля порядка 100 кгс. Для каждого из них требуется мощность около 2000 квт, охлаждение — 220 л воды в минуту и капитальные затраты в несколько сотен тысяч долларов. Национальная магнитная лаборатория в Кембридже (штат Массачусетс) включила в план своих работ чрезвычайно эффективную конструкцию магнита на 250 кгс.

Это устройство, стоимостью во много миллионов долларов, потребует мощности около 8000 квт, а его охлаждение поднимет температуру в реке Чарльз-Ривер на 0,5°. Наиболее мощный магнит такого типа, известный автору, — это магнит на 150 кгс в Военно-морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне (округ Колумбия).

Эти требования громадной мощности для соленоидов, рассчитанных на большие поля и подобных тем, которые описаны выше, вызваны сопротивлением проводников обмотки магнита. Однако если магнитное поле уже создано, в принципе не требуется никакой мощности для его поддержания (так, например, никакой энергии не требуется для поддержания магнитного поля постоянного магнита). Электрическая энергия переходит в тепло благодаря потерям, равным i^2R . Поскольку одним из свойств сверхпроводников является отсутствие сопротивления, очевидны потенциальные преимущества их использования в качестве обмотки магнитов. Однако для этого нужно, чтобы сверхпроводники обладали еще и другими специфическими свойствами. Необходимо также, чтобы сверхпроводник обладал нулевым или пренебрежимо малым сопротивлением в наибольшем магнитном поле, созданном этим магнитом, в то время как по нему протекает ток требуемой плотности. Требования, накладываемые на плотность тока, определяются уравнением (3), из которого ясно, что для возбуждения поля 100 ккс при идеальной упаковке ($k = 1$) и толщине обмотки в пределах десяти сантиметров, необходима плотность тока по крайней мере порядка 10^4 а/см². В наиболее неблагоприятном случае, когда $k = 0,1$, потребовалась бы плотность тока 10^5 а/см². Сверхпроводящие материалы, применяемые сейчас для создания магнитов, удовлетворяют этим общим требованиям.

СВЕРХПРОВОДНИКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТОВ

Источником последних успехов в этой области явилось неожиданное открытие, сделанное в Лаборатории «Бэлл-Телефон»¹. Сущность открытия в том, что у некоторых сверхпроводников (таких, как Nb₃Sn) даже в больших магнитных полях плотность тока может еще оставаться большой — порядка 10^5 а/см². И не в первый раз возникли надежды на возбуждение мощных магнитных полей при сравнительно малой затрате энергии. Сразу после открытия сверхпроводимости² в Лейденском университете в 1911 г. Камерлинг-Оннес понял те преимущества, которые могут дать для этой цели сверхпроводники. Хотя некоторые из его первых наблюдений были очень обнадеживающими³ (такие, как измерение критического тока), после того как он нашел, что магнитное поле всего в несколько сотен гаусс разрушает сверхпроводимость исследованных им материалов (Hg, Pb, Sn)⁴, все надежды угасли. В 1930 г. В. Дж. де Гааз и Дж. Фогт, тоже в Лейдене, нашли, что сплав Рb — Вi остается сверхпроводящим в умеренных полях, и высказали предположение, что возможно создание сверхпроводящих магнитов для возбуждения поля с напряженностью⁵ около 20 ккс. И хотя в дальнейшем после обескураживающих наблюдений эта идея была отвергнута⁶, теперь известно, что такие сверхпроводящие магниты со свойствами, приближающимися к ожидавшимся, действительно возможны⁷. Им, по-видимому, не повезло потому, что тогда отсутствовала необходимая технология, играющая важную роль в основных практических достижениях по созданию сверхпроводящих магнитов. Если бы тогда был достигнут успех в создании сверхпроводящего магнита, это, вероятно, ускорило бы совершенствование технологии производства сверхпроводящих магнитов по крайней мере на одно или два десятилетия. Сейчас трудно предвидеть, какое влияние могло бы оказать это достижение на развитие криогенной техники и на наше понимание основ явления сверхпроводимости.

Три главных фактора предопределили возможность практической реализации сверхпроводящих магнитов с большими полями. Во-первых, успехи последних десятилетий в области криогенной техники позволили

развернуть исследования по низким температурам во многих лабораториях, в противоположность малому числу специально оборудованных лабораторий того времени. Во-вторых, богатство информации о сверхпроводимости и сверхпроводящих материалах, полученной из обширных исследований Б. Маттиаса из Лаборатории «Бэлл-Телефон» и Дж. Хульма из Исследовательской лаборатории «Вестингауз» и их сотрудников. И, наконец, в-третьих по счету, но не по значению, теперь существует действительная потребность в сверхпроводящих магнитах. Например, С. Аутлеру из Лаборатории «Линкольн» нужен был магнит, способный создавать поля с напряженностью в несколько тысяч гаусс для управления микроволновым лазером на твердом теле. Поскольку лазер сам по себе требует охлаждения до температуры жидкого гелия, возможность использовать сверхпроводящий магнит оказалась особенно привлекательной. Успех Аутлера в создании соленоида с обмоткой из ниобия, который давал поле в $4,3 \text{ кэс}$ ⁸, вдохновил Р. Компфнера из Лаборатории «Бэлл-Телефон» обратить внимание некоторых сотрудников на потенциальную ценность сверхпроводящих магнитов, способных возбуждать сравнительно большие поля, для их использования в микроволновой электронике, которой он тогда интересовался. В обоих случаях для разворачивания исследований оказалась существенной практическая потребность, хотя всего лишь за несколько лет до этого вообще предполагалось, что сверхпроводящие магниты на несколько килогаусс невозможны⁹. Не надо забывать, что значительный шаг вперед сделал Г. Интема, который в 1955 г. в краткой заметке¹⁰ сообщил о запуске электромагнита с железным сердечником и сверхпроводящей обмоткой. Это достижение, однако, не привлекло широкого внимания; вероятно, потому существовала неопределенность в отношении напряженности магнитного поля обмоток такой конфигурации.

По современным стандартам магнитные поля, которые удалось получить в лазерных сверхпроводящих электромагнитах, вполне умеренные: надеялись получить 10 кэс , а получение таких полей, как 15 кэс , находится лишь в стадии обсуждения. Одним из первых материалов для обмоток, исследованных в Лаборатории «Бэлл-Телефон», был сплав молибдена с рением. Маттиас предложил этот материал не потому, что от него ожидали получить максимально возможное критическое поле, а потому, что его критическая температура (ниже которой сопротивление равно нулю) оказалась одной из наивысших ($\sim 10^\circ \text{ K}$) среди пластичных материалов. Ожидалось, что потенциально это будет один из лучших материалов с точки зрения изготовления из него проволоки. Использованием Mo — Re была доказана возможность создания сверхпроводящих магнитов (рис. 1), рассчитанные на поля свыше 15 кэс ¹¹, что превзошло самые оптимистические ожидания.

Тем временем (в 1960 г.) стало казаться, что, возможно, существуют материалы, которые позволили бы получить поля по крайней мере в 20 , а возможно, и в 30 кэс . Однако известные материалы, имеющие высокие критические температуры (например, Nb_3Sn , $T_c = 18^\circ \text{ K}$; V_3Si , $T_c = 17^\circ \text{ K}$; V_3Ga , $T_c = 16^\circ \text{ K}$), были по сравнению с Mo — Re хрупкими, поэтому главное внимание было обращено на другие пластичные материалы, такие, как Nb — Zr и Nb — Ti. После того как Nb_3Sn исследовали в полях $\sim 18 \text{ кэс}$ и обнаружили, что этот материал не только сохраняет сверхпроводимость, но способен и пропускать большие токи, — даже после этого не было предпринято никаких попыток проверить его свойства в отношении плотности тока с помощью магнита Биттера (может возбуждать поля до 88 кэс), до тех пор, пока не был разработан способ получения «проволоки» из Nb_3Sn ¹. Это произошло потому, что ожидаемый скромный выигрыш в напряженности поля, казалось, требовал слишком дорогой

оплаты, а метод создания магнитов из этого материала еще не был разработан.

Через несколько дней после того, как было неожиданно обнаружено, что маленькие образцы хрупкого Nb_3Sn выдерживают токи плотностью 3000 а/см^2 в поле 88 кгс , последовало такое же неожиданное открытие, что соответствующим образом приготовленная «проволока» с сердечником (см. рис. 6) выдерживает плотность тока, превышающую $100\,000 \text{ а/см}^2$ в магнитном поле 88 кгс ¹. После того как эти наблюдения

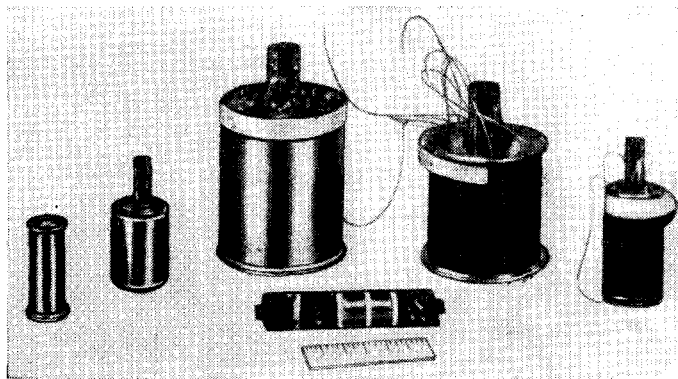


Рис. 1. Фотография первых сверхпроводящих магнитов, намотанных проволокой из сплава $Mo - Re$ (передний план), проволокой из сплава $Nb - Zr$ (справа) и «проволокой» с сердцевинкой из Nb_3Sn (слева).

Длина шкалы равна $7,62 \text{ см}$.

были подтверждены, стало ясно, что сверхпроводящие магниты с высокими полями наконец становятся реальностью. Вскоре последовали результаты, которые показали, что сверхпроводимость в больших магнитных полях присуща не только одному Nb_3Sn . Среди первых материалов, которые в принципе считались пригодными для создания магнитов, были $Nb - Zr$ ^{7, 12, 13}, $Nb - Ti$ ^{7, 12}, V_3Ga ¹⁴ и V_3Si ¹⁴.

Начиная с 1961 г., из сплавов $Nb - Zr$ и из Nb_3Sn были созданы практически используемые сверхпроводящие магниты на поля около 70 кгс . Сотрудники Исследовательской лаборатории «Дженерал-Электрик» сконструировали модель магнита из Nb_3Sn на поля в 100 кгс ¹⁵. Ожидается, что скоро будут построены действующие магниты, способные создавать поля больше 100 кгс .

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

История развития нашего понимания природы сверхпроводников с высокими критическими полями представляется даже еще более запутанной, чем путь, который привел к созданию сверхпроводящих магнитов. Здесь дана лишь краткая сводка наших сегодняшних представлений и некоторых наиболее существенных результатов, которые позволили прийти к этим представлениям. Большая часть наших новых знаний в этой области развилась после того, как появились первые наблюдения свойств Nb_3Sn в больших магнитных полях. Эти наблюдения были не только неожиданными, но и не поддавались простому теоретическому объяснению. В действительности же основы теории этих явлений уже существовали, но в широких кругах это еще не было осознано. С тех пор наши идеи

претерпели серьезные изменения, и в будущем следует ожидать еще больших успехов.

Сверхпроводники удобно разделить на два класса: сверхпроводники первой группы (известные так же как почти идеальные сверхпроводники) и сверхпроводники второй группы. Сверхпроводники с высокими критическими полями относятся к сверхпроводникам второй группы, однако

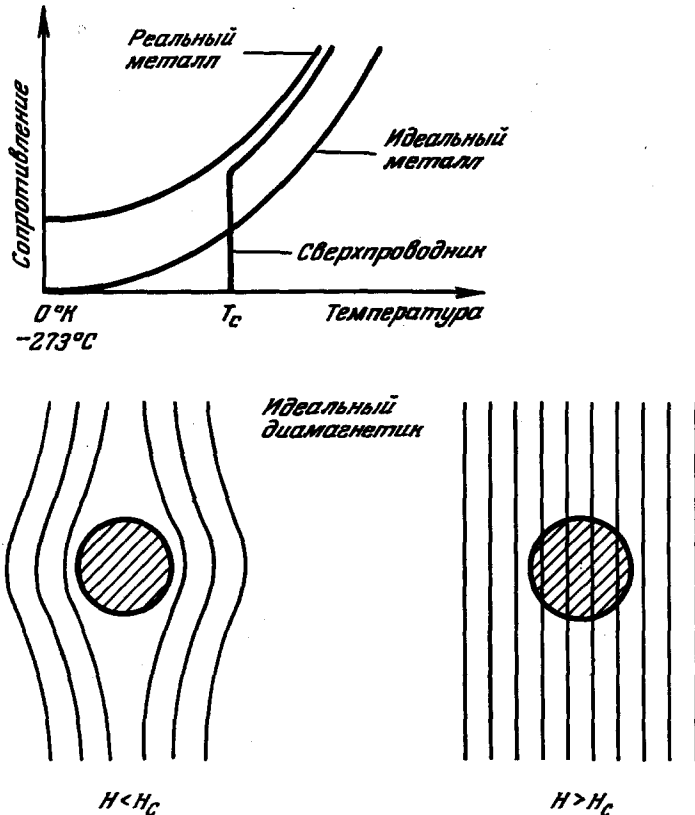


Рис. 2. Потеря сопротивления сверхпроводниками при критической температуре сравнивается с температурной зависимостью сопротивления реального и идеального металла (верх).

Внизу показан обратимый переход почти идеального сверхпроводника первой группы в магнитном поле.

чтобы они могли выдерживать требуемые для магнитов большие плотности тока, их физическая структура должна быть неоднородной. Сверхпроводники первой группы известны также как «мягкие» сверхпроводники, а сверхпроводники второй группы, когда они могут пропускать большой ток, — как «жесткие» сверхпроводники. Эта терминология, однако, неоднозначна. Сверхпроводники как первой, так и второй группы характеризуются температурой перехода, или критической температурой, ниже которой их сопротивление равно нулю или по крайней мере столь мало, что его до сих пор еще не удалось измерить. В верхней части рис. 2 сравнивается изменение сопротивления с температурой у сверхпроводника, у типичного несверхпроводящего металла и, соответственно, у идеального металла (бесконечно большой, чистый и совершенный монокристалл, сопротивление которого при 0°K равно нулю). Сверхпроводимость обнаружена при-

мерно у двух дюжин элементов и более чем у двухсот сплавов и соединений. Их критические температуры лежат в интервале от нескольких тысячных градуса Кельвина до 18°K у Nb_3Sn , сверхпроводимость в котором была открыта Маттиасом и его сотрудниками¹⁶ в 1954 г.

Сверхпроводники первой группы — это почти идеальные диамагнетики. Это означает, что слабое магнитное поле из них вытолкнуто, за исключением тонкого поверхностного слоя толщиной около 1000 \AA , известного как «глубина проникновения» (см. рис. 2, внизу слева). Когда напряженность магнитного поля становится равной напряженности критического поля (обычно не более нескольких сотен гаусс), поле вдруг проникает внутрь образца и в более высоких полях материал ведет себя подобно

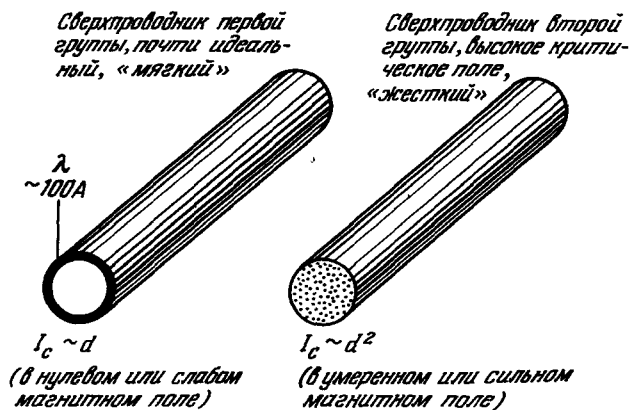


Рис. 3. Характеристика сверхпроводящей проволоки по критическому току.

В сверхпроводнике первой группы ток течет по поверхности образца, в то время как в сверхпроводнике второй группы — по всему сечению.

обычному несверхпроводящему материалу. Это явление близко к обратному, и когда магнитное поле снижается до значения критического поля, магнитное поле вновь выталкивается из образца. Это явление было открыто Мейснером и Оксенфельдом¹⁷ и носит их имя. В сверхпроводниках первой группы ток течет только по тонкому поверхностному слою порядка глубины проникновения, и поэтому критический ток проволоки (максимально возможный ток, при котором материал еще остается в сверхпроводящем состоянии) меняется пропорционально диаметру проволоки. Это показано слева на рис. 3. Большинство сверхпроводников первой группы — это чистые элементы, такие, как свинец, ртуть и олово, которые являются и механически мягкими материалами. Отсюда идет и название — «мягкие» сверхпроводники. Их свойства близки к идеальным, и к ним непосредственно приложима термодинамика и теория Бардина, Купера и Шриффера (БКШ)¹⁸.

Сверхпроводники второй группы более сложны, и их свойства не так хорошо изучены. «Идеальные» сверхпроводники второй группы не могут пропускать ток, находясь в большом магнитном поле (так, как это требуется для сверхпроводящих магнитов), хотя в некоторых случаях они могут оставаться в сверхпроводящем состоянии даже в очень сильных магнитных полях, много больше 200 кэс . В них обнаруживается эффект Мейснера — Оксенфельда: магнитное поле начинает из них выталкиваться, когда приложенное извне магнитное поле уменьшается до сравнительно малых значений. В слабых полях они ведут себя подобно сверхпроводникам

первой группы. Однако если при увеличении поля началось проникновение магнитного потока внутрь материала, оно происходит не скачком, а продолжает развиваться по мере увеличения поля. Некоторые другие свойства почти «идеальных» сверхпроводников второй группы будут обсуждаться ниже.

Вопросы, касающиеся сверхпроводников, способных пропускать токи большой плотности в больших магнитных полях, рассматриваются в следующем разделе.

Уже в течение многих десятилетий было известно, что у некоторых сплавов сверхпроводимость в известной степени сохраняется вплоть до полей в несколько десятков килогаусс. Из обширной теоретической работы Ф. Лондона¹⁹ было также известно, что если толщину сверхпроводника первой группы сделать меньше глубины проникновения, сверхпроводимость в этом образце может сохраниться в полях, во много раз превышающих его критическое термодинамическое поле. Это происходит потому, что теперь сверхпроводник уже не должен совершать всю работу по выталкиванию приложенного магнитного поля (т. е. $H^2V/8\pi$, где H — поле, V — объем тонкого сверхпроводника). Следовательно, свободная энергия тонкого образца в магнитном поле будет меньше свободной энергии массивного материала в том же поле. Вплоть до последних лет существовало общее убеждение, что существование сверхпроводимости в некоторых полях, существенно больших, чем критические поля сверхпроводников первой группы, связано с наличием особой структуры типа сетки²⁰, образованной системой тонких сверхпроводящих нитей, которые, если уж они возникли, остаются стабильными. Действительно, большое критическое поле Nb_3Sn было первоначально объяснено существованием таких нитей¹. Предполагалось, что они, по-видимому, связаны с дислокациями^{7, 21, 22}. Однако было трудно объяснить очень большие плотности тока и еще более трудно совместить эту идею с результатами экспериментов по измерению теплоемкости в V_3Ga , которые показали, что большая часть материала остается сверхпроводящей в поле 70 кс²³. К тому времени, когда это стало ясным, главным образом благодаря работам Б. Гудмена^{24, 25}, было также установлено, что совокупность теоретических работ советских ученых: В. Л. Гинзбурга, Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосова и Л. П. Горькова²⁶ — дает объяснение свойств сверхпроводников второй группы. Эти работы приобрели известность под названием ГЛАГ-теории. Они показали, что если эффективный размер когерентности $\xi_{эфф}$ (по существу, среднее расстояние спаривания электронов в теории БКШ) меньше глубины проникновения λ , то сверхпроводник может спонтанно разбиться на чередующиеся нормальные и сверхпроводящие области (размер которых оказывается меньше глубины проникновения). Свободная энергия границы раздела этих областей отрицательна. В этих условиях значительная часть материала находится в сверхпроводящем состоянии; тело находится в устойчивом состоянии, и его можно изучать методами термодинамики. Было также показано, что эффективная длина когерентности определяется средней длиной свободного пробега электрона l , когда l существенно меньше ξ_0 — длины когерентности чистого массивного материала.

Если $\xi_{эфф}$ больше, чем $\sqrt{2} \lambda$, сверхпроводник будет сверхпроводником первой группы, если $\xi_{эфф}$ меньше, чем $\sqrt{2} \lambda$, — сверхпроводником второй группы. Чтобы делать какие-либо обобщения, необходимо рассмотреть также и электронные свойства сверхпроводников; оказывается, что большинство чистых металлических сверхпроводников являются сверхпроводниками первой группы, а большинство сплавов и (по менее очевидным причинам) интерметаллических соединений — сверхпровод-

никами второй группы. Это происходит потому, что средняя длина свободного пути электрона в чистом металле при низкой температуре относительно велика и часто на несколько порядков превосходит эту величину у сплава в связи с рассеянием электронов на примесных атомах.

СВЕРХПРОВОДНИКИ, СПОСОБНЫЕ ПРОПУСКАТЬ ТОКИ БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ В БОЛЬШИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

По идеальному сверхпроводнику второй группы в большом магнитном поле не может протекать ток от внешнего источника. Сила Лоренца $[iH]$ стремится удалить линии магнитного потока из материала, и это приводит к тому, что он перестает быть сверхпроводником. Однако большинство сверхпроводников второй группы не идеальны, и через них может идти некоторый транспортный ток. Действительно, трудно приготовить почти идеальный сверхпроводник второй группы. По этой причине линии магнитного потока «пришпиливаются» к дефектам материала — химическим, структурным или и тем и другим. Это явление противодействует силам Лоренца и, таким образом, обеспечивает возможность протекания транспортного тока. Максимально возможная, или критическая, плотность тока определяется прочностью «пришпиливания» и количеством «пришпиливающих» мест. Когда плотность тока в сверхпроводнике второй группы начинает приближаться к критической, наблюдается явление ползучести («крипа») магнитного потока. Это было подробно исследовано И. Кимом с сотрудниками²⁷ и теоретически рассмотрено П. Андерсоном²⁸ с точки зрения процессов активации. Вместе с тем прилипание магнитных силовых трубок к физическим неоднородностям и ползучесть магнитного потока обеспечивают возможность для протекания транспортного тока, и эти явления имеют еще два других следствия. Во-первых, переход из сверхпроводящего состояния в нормальное теперь четко не определен; во-вторых, намагничивание такого материала необратимое. Это указывает на возникновение большой петли гистерезиса, приводящей к тому, что при перемагничивании энергия переходит в тепло. Оба следствия оказывают большое влияние на свойства сверхпроводящих соленоидов.

Сверхпроводники с большими критическими полями в состоянии, когда они могут пропускать ток, в двух отношениях отличаются от сверхпроводников первой группы. Во-первых, они не обнаруживают эффекта Мейснера — Оксенфельда. Однако при первичном помещении их в магнитное поле они могут вытолкнуть из занимаемого ими объема значительно большее магнитное поле, чем сверхпроводники первой группы. Эта величина определяется критической плотностью тока и формой образца. По мере увеличения напряженности магнитного поля оно постепенно проникает все дальше и дальше в образец. Если теперь, после существенного проникновения магнитного поля, начать уменьшать напряженность внешнего поля, то окажется, что магнитное поле будет стремиться остаться внутри образца. Это свойство сверхпроводников с большими критическими полями достаточно подробно было рассмотрено И. Бином²⁹. Во-вторых, ток течет более или менее однородно по всему сечению материала (рис. 3), а не исключительно по поверхности. Таким образом, критический ток будет теперь зависеть от квадрата диаметра проволоки, а критическая плотность тока не будет зависеть от диаметра, при предположении, что внутренняя структура материала остается неизменной.

Большие плотности тока достигаются обычно введением в материал как можно большего количества различных физических дефектов, например дислокаций. Такие пластичные материалы, как сплавы Mo — Re или

Nb — Zr, обычно вытягиваются в проволоку диаметром 0,05—0,25 мм при начальном диаметре около 1—5 мм, без какого-либо промежуточного отжига. Такого рода практика оказывается особенно эффективной для создания дислокаций и других дефектов внутри материала. Влияние пластической деформации в сплаве Nb — Zr, содержащем 25% Zr, показано на рис. 4. Такое увеличение плотности критического тока более чем в десять раз при уменьшении диаметра проволоки до 0,006 см — типичное явление, возникающее при механическом волочении пластичных сплавов.

Введение максимального числа дислокаций и связанных с ними дефектов в такие хрупкие материалы, как Nb₃Sn,—задача более тонкая.

В случае Nb₃Sn плотности тока, превышающие 10^5 а/см², были получены в результате тщательного подбора температуры, при которой получается материал^{31, 32}. Важными факторами являются также размер частиц и время реакции. По-видимому, к наилучшим результатам приводит такой выбор температуры (около 950° С), когда возникает равновесие между скоростью образования Nb₃Sn и скоростью удаления дислокаций и связанных с ними дефектов из материала в результате отжига или рекристаллизации. Оба процесса ускоряются с увеличением температуры. Критические плотности тока, достигнутые таким образом, более чем в 50 раз превосходят критическую плотность тока у Nb₃Sn, полученного из расплава¹ с температурой больше 2000° С.

Типичные кривые зависимости критической плотности тока от напряженности магнитного поля при температуре кипения гелия (4,2° К) для нескольких рассмотренных выше материалов показаны на рис. 5. И здесь влияние деформации на критическую плотность тока в случае сплава Nb — Zr тоже очевидно. Однако критическое поле, соответствующее нулевой плотности тока, существенно не меняется при пластической деформации.

Это и понятно, поскольку для неупорядоченных сплавов влияние деформации на электрическое сопротивление, а следовательно, и на среднюю длину свободного пробега электрона l и эффективную длину когерентности $\xi_{эфф}$, обычно мало, так как они уже обладают достаточно высоким сопротивлением. Из уравнения (3) ясно, что ниобий-циркониевый сплав состава Nb₃Zr оказывается бесполезным для обмотки сверхпроводящего соленоида, способного возбудить поле больше 70 кгс, из-за быстрого падения критической плотности тока при такой напряженности поля. Однако этот сплав можно использовать в качестве внешней обмотки

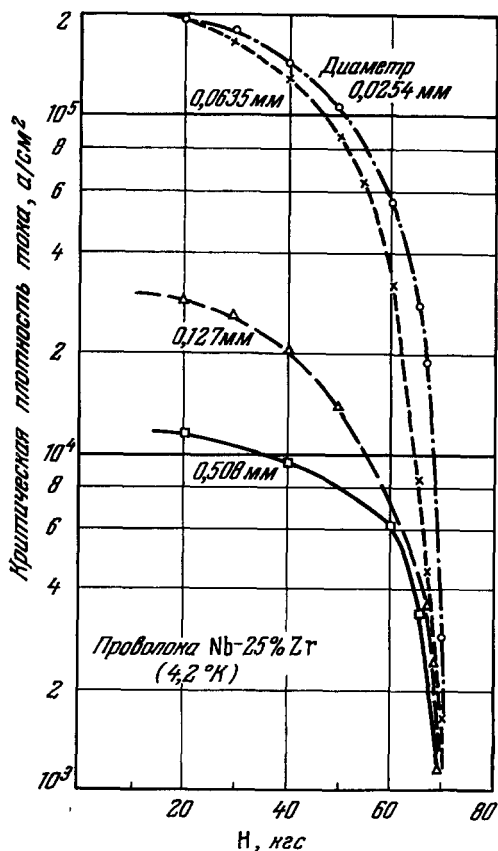


Рис. 4. Сильное влияние механической деформации проволоки из 3Nb — Zr (выражено через диаметр проволоки) на критическую плотность тока.

деформации. Это и понятно, поскольку для неупорядоченных сплавов влияние деформации на электрическое сопротивление, а следовательно, и на среднюю длину свободного пробега электрона l и эффективную длину когерентности $\xi_{эфф}$, обычно мало, так как они уже обладают достаточно высоким сопротивлением. Из уравнения (3) ясно, что ниобий-циркониевый сплав состава Nb₃Zr оказывается бесполезным для обмотки сверхпроводящего соленоида, способного возбудить поле больше 70 кгс, из-за быстрого падения критической плотности тока при такой напряженности поля. Однако этот сплав можно использовать в качестве внешней обмотки

соленоида сложной конструкции. Поле, при котором критическая плотность тока в Nb_3Sn падает настолько, что этот материал становится уже бесполезным в качестве обмотки магнита, сейчас точно неизвестно. Еще не получены стационарные магнитные поля выше приблизительно 150 кгс для проверки критической плотности тока Nb_3Sn . Косвенные наблюдения позволяют высказать предположение, что это поле существенно больше 200 кгс ^{7, 12, 33}. Измерения в импульсных полях, проведенные Х. Хартом и его сотрудниками ³⁴, показали, что критическая плотность тока в «проводах» из Nb_3Sn остается достаточно высокой для использования материала в сверхпроводящих магнитах с полями по крайней мере вплоть до 190 кэ.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ
МАГНИТЫ

Сплавы Nb — Zr и соединения Nb_3Sn широко используются в настоящее время в сверхпроводящих соленоидах. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и ограничения. Сплавы Nb — Zr пластичны, но ограничены диапазоном полей около 100 кгс и меньше, хотя можно было бы повысить поле выше 70 кгс, увеличив содержание циркония ¹². Магниты с проволокой из Nb — Zr часто обнаруживают эффект «тренировки» ³⁵

и практически могут выдержать плотности тока, существенно меньшие по сравнению с теми, которые наблюдаются в малых образцах ³⁵⁻³⁷. Соединение Nb_3Sn — хрупкое, и изготовление из него сверхпроводящих магнитов сопряжено со многими трудностями, хотя описанный ниже способ получения «провода» с сердцевинкой оказался очень успешным. Добавим, что разрабатывается еще несколько способов; одни из них не требуют нагревания уже изготовленного магнита до приблизительно 1000° С, как это делается в случае «провода» с сердцевинкой. Магниты, сделанные из «провода» с сердцевинкой, не обнаруживают ни заметного эффекта тренировки, ни ухудшения свойств соленоида в результате перехода в нормальное состояние.

Сверхпроводящие соленоиды с обмотками из Nb_3Sn изготавливаются для продажи рядом компаний, в частности, объединениями «Авко», «Линде», «Магнион», «Вестингауз» и «Вариан». Магнитные поля порядка 70 кгс можно получить в рабочем пространстве диаметром в несколько сантиметров. В рабочем пространстве с диаметром, существенно большим 10 см, допустимые поля будут меньше. С помощью нанесения на поверхность ниобий-циркониевой проволоки слоя меди удалось частично предо-

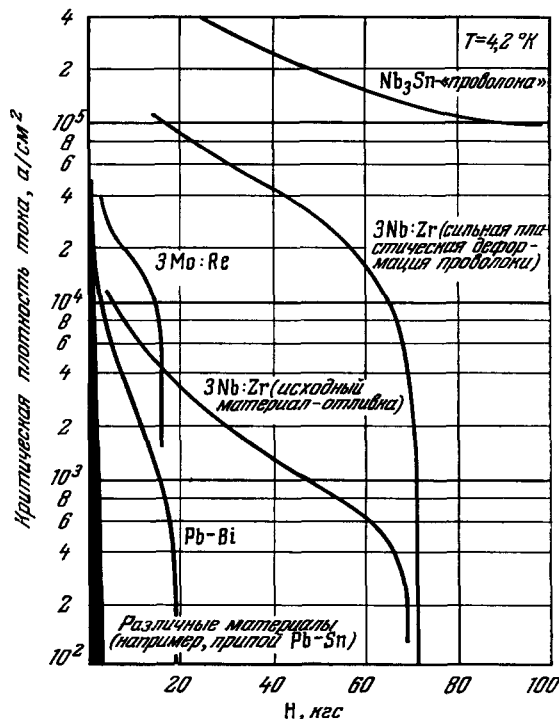


Рис. 5. Типичные зависимости критической плотности тока от внешнего магнитного поля для некоторых материалов, представляющих интерес для производства сверхпроводящих магнитов.

леть трудности, связанные с тем, что критическая плотность тока в соленоидах оказывалась меньше, чем у коротких образцов. С этой же целью оказывается, по-видимому, полезным пространственное разнесение обмоток магнита и применение толстых слоев изоляции. Хотя нам еще полностью не известна природа этого «эффекта близости» («proximity-effect»), возможно, что важную роль здесь играет результирующее уменьшение количества тепла, выделяющегося в единице объема обмотки за время установления стационарного значения поля. Возможно, что в случае проволоки, покрытой медью, наличие шунта с низким сопротивлением на поверхности проволоки приводит к локальному увеличению постоянной времени

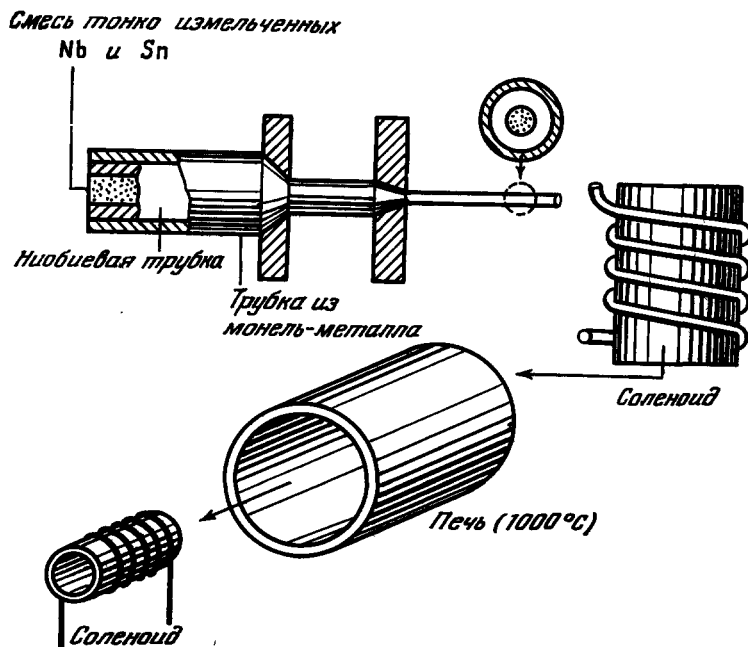


Рис. 6. Схема процесса изготовления магнита из «проволоки» с сердцевинной из Nb_3Sn .

установления стационарного режима. Это способствует уменьшению частоты скачков магнитного потока, которые (поскольку при этом выделяется тепло) могут вызвать своего рода цепную реакцию таких скачков и привести к преждевременному переходу обмотки в нормальное состояние.

На рис. 1 справа показаны две ниобий-циркониевые катушки, с которых началось их исследование в Лаборатории «Бэлл-Телефон». В обеих отверстия равны почти 0,5 см; они дают максимальное поле около 40 кэс. На меньшую катушку намотана проволока диаметром 0,025 см, полученная механическим волочением из проволоки диаметром 0,05 см, которая использована для обмотки большей катушки. Меньший магнит имеет приблизительно в два раза большую критическую плотность тока, чем больший (см. (3)). Это еще раз показывает, как важно учитывать механическое состояние сверхпроводников с большими критическими полями.

На рис. 6 показан процесс приготовления «проволоки» с сердцевинной из Nb_3Sn . Тонкие порошки ниобия и олова после тщательного перемеши-

вания запрессовываются в цилиндрические пилюли диаметром 1 см. Эти пилюли помещаются внутри тяжелой ниобиевой трубы (толщина стенки около 0,5 см) длиной около 5 м. Эта труба в свою очередь покрывается тонкой внешней оболочкой монель-металла, главным образом для того, чтобы предотвратить при волочении захватывание ниобия в фильерах. Эта заготовка затем механически протягивается в «проволоку» диаметром обычно 0,2—2 мм. В этом состоянии проволока имеет сердцевину из пластичных, еще не прореагировавших между собой ниобия и олова. Из этой проволоки теперь наматывается соленоид, который затем в течение нескольких часов выдерживается при температуре около 950° С. В результате образуется хрупкое соединение Nb₃Sn. На этом процесс изготовления соленоида заканчивается. Такой способ явился результатом усовершенствования³⁸ первоначально предложенной методики¹, и он оказался наиболее успешным. С его помощью было изготовлено много кусков такой «проволоки». Длина каждого из них равнялась нескольким тысячам метров. Можно было бы ожидать, что этот процесс окажется чувствительным к наличию разрывов непрерывности сердцевины проволоки. Однако вопреки этим ожиданиям трудности оказались не так уж велики. Немногие возникшие проблемы, как потом выяснилось, оказались связанными с загрязнениями другими металлами, недостаточным предварительным смешиванием порошков и механическими дефектами в трубках из ниобия и монеля*).

Три первых магнита из Nb₃Sn показаны слева на рис. 1. Размер отверстия у этих магнитов около 0,5 см. Максимальное поле меньшего магнита — около 20 кгс, среднего — около 40 кгс, а большего — около 70 кгс. На рис. 7 показан магнит с защитной оболочкой, диаметр отверстия которого около 3 см. Магниты таких размеров имеют полезное рабочее пространство, достаточное для других исследований, и могут давать магнитные поля больше 70 кгс.

При изготовлении катушек, удовлетворяющих определенным требованиям, приходилось преодолевать некоторые случайные трудности, однако ни один магнит, изготовленный в Лаборатории «Бэлл-Телефон» из проволоки с сердцевиной из Nb₃Sn, не разрушился ни при испытаниях, ни в процессе эксплуатации. Было сконструировано и испытано несколько дюжин таких магнитов, несколько катушек 15—20 раз переводились в нормальное состояние, и большинство из них многократно отогревались до комнатной температуры и вновь охлаждались до температуры жидкого гелия.

Такая надежность в работе весьма удовлетворительна, так как, вообще говоря, существует много возможных источников различных осложнений. То, что эти осложнения до сих пор не проявились, связано с удачным расположением составных частей «проволоки» с сердцевиной из Nb₃Sn. Хрупкая сердцевина сжата ниобиевой оболочкой, так как предполагается, что ниобий имеет большой коэффициент теплового расширения, а вся конструкция охлаждается от ~1000° С. Кроме того, очень

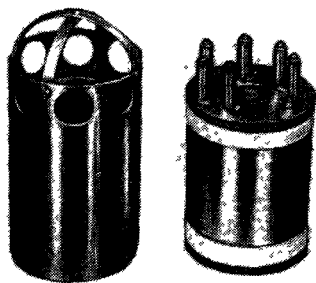


Рис. 7. Магнит из Nb₃Sn с рабочим отверстием диаметром 3 см на поле больше 70 кгс. Высота магнита 10 см.

*) В Советском Союзе были построены сверхпроводящие соленоиды из сплава Nb—Zr и из Nb₃Sn и магниты с железными сердечниками на максимальные поля 30 и 46,5 кгс⁴¹. (Прим. перев.)

чистый ниобий при низкой температуре обладает достаточно малым сопротивлением, и поэтому ниобиевая оболочка играет роль временного шунта около слабых мест в обмотке. Таким образом предотвращается спадание магнитного поля. Удельное сопротивление Nb_3Sn в нормальном состоянии относительно велико. Отметим еще, что это соединение может выдержать температуру приблизительно до $1000^\circ C$ без ухудшения его свойств, а тепловой удар не вызывает разрушения материала. Межвитковая изоляция в катушках из «провода» с Nb_3Sn -сердцевиной осуществляется с помощью монель-металла или каких-нибудь других материалов с малым сопротивлением; для улучшения постоянной времени изоляцию между слоями обмотки желательнее делать из диэлектрика, например кварцевого волокна.

Постоянная времени в сек равна $t = L/R$, где L — индуктивность в $гн$, R — сопротивление в $ом$. При спадании магнитного поля во время перехода катушки в нормальное состояние такое ее устройство обеспечивает току путь по участку с малым сопротивлением. Это предотвращает появление перенапряжений. По мере увеличения размеров магнитов и величины напряженности магнитного поля эти проблемы приобретают еще большее значение; кроме того, возможно появление дополнительных трудностей. Была разработана и другая методика получения соединения Nb_3Sn в форме, подходящей для изготовления магнитов. Исследователи из «Рейдио Корпорейшн оф Америка» сообщили о методе нанесения на проволочное основание тонкого слоя Nb_3Sn ³⁹. В «Нейшл Резёрч Корпорейшн» получены ниобиевые ленты, покрытые соединением Nb_3Sn . Для того чтобы после намотки магнита не требовалось последующего нагревания, в обоих случаях слой Nb_3Sn делается тонким. Недавно появилось сообщение о модели, способной давать поле напряженностью около $90 кгс$ ⁴⁰. Если будет доказана осуществимость таких магнитов, они будут иметь преимущества, поскольку будут устранены все трудности, связанные с необходимостью нагревания магнита после его намотки приблизительно до $1000^\circ C$ для образования соединения.

Достигнутые успехи показывают, что, несмотря на все возникшие трудности, нет ни малейшего сомнения в осуществимости надежных и практичных сверхпроводящих магнитов на $100 кгс$, имеющих достаточно большой для использования рабочий объем; они, по-видимому, скоро появятся.

Не очень далеко и то время, когда будут построены магниты, способные создавать поле около $200 кгс$. Весьма возможно, что при работе над возбуждением больших полей в больших объемах (например, $100 кгс$ в $1 м^3$) возникнут грандиозные трудности. Тем не менее нет сомнений, что если техника будет испытывать острейшую нужду в таких устройствах, задача их создания будет решена.

Сверхпроводники с большими критическими полями представляют собой столь новые материалы, что многие потенциальные возможности их использования еще не ясны. До появления этих материалов инженер не мог даже думать о проекте какого-нибудь устройства, для которого требовалось бы создавать магнитное поле в $50—100 кгс$. Вот некоторые наиболее очевидные возможные направления применения сверхпроводящих магнитов: возбуждение больших магнитных полей для различных исследовательских работ, магниты для ускорителей элементарных частиц и пузырьковых камер, магниты для управляемого термоядерного синтеза (если будет доказана его осуществимость), магниты для магнитогидродинамических генераторов, сверхпроводники с большими критическими токами и полями для мощных систем электропередачи на постоянном токе, а также для экранирования и формирования магнитных полей.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. E. Kunzler, E. Buchler, F. S. L. Hsu, J. H. Wernick, Phys. Rev. Letts. 6, 89 (1961).
2. H. K. Onnes, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden 120b, 122b (1914).
3. Там же, 134b, 133d (1913).
4. Там же, 139f (1914).
5. W. J. de Haas and J. Voogd, там же, 208b (1930); 214b (1931).
6. W. H. Keesom, там же, 234f (1935); Physica 2, 35 (1935).
7. J. E. Kunzler, Rev. Mod. Phys. 33, 1 (1961).
8. S. H. Autler, Rev. Sci. Instrum. 31, 369 (1960).
9. Д. Шенберг, Сверхпроводимость, М., ИЛ, 1955.
10. G. B. Untema, Phys. Rev. 98, 1197 (1955).
11. J. E. Kunzler, E. Buchler, F. S. L. Hsu, B. T. Matthias, C. J. Wahl, J. App. Phys. 32, 325 (1961).
12. J. E. Kunzler, Bull. Amer. Phys. Soc. 6, 298 (1961).
13. T. G. Berlincourt, R. R. Hake, D. H. Leslie, Phys. Rev. Letts. 6, 671 (1961).
14. J. H. Wernick, F. J. Morin, F. S. L. Hsu, J. P. Maita, D. Dorsi, J. E. Kunzler, High Magnetic Fields (ed H. Kolm, B. Lax, F. Bitter, R. Mills), John Wiley and Sons, New York, 1961, стр. 609.
15. D. L. Martin, M. G. Benz, C. A. Bruch, C. H. Rosner, Cryogenics 3, 114 (1963).
16. B. T. Matthias, T. H. Geballe, S. Geller, E. Corenzwit, Phys. Rev. 95, 1435 (1954).
17. W. Meissner, R. Ochsenfeld, Naturwiss. 21, 787 (1933).
18. J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).
19. F. London, в сб. Superfluids, vol. 1, John Wiley and Sons, New York, 1950.
20. K. Mendelssohn, Proc. Roy. Soc. A152, 34 (1935).
21. R. Shaw, D. E. Mapother, Phys. Rev. 118, 1474 (1960).
22. J. J. Hauser, E. Buchler, Phys. Rev. 125, 142 (1962).
23. F. J. Morin, J. P. Maita, H. J. Williams, R. C. Sherwood, J. H. Wernick, J. E. Kunzler, Phys. Rev. Letts. 8, 275 (1962).
24. B. V. Goodman, IBM J. Res. Developm. 6, 63 (1962).
25. B. V. Goodman, Phys. Letts. 1, 215 (1962).
26. В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау, ЖЭТФ 20, 1064 (1950); А. А. Абрикосов, ЖЭТФ 32, 1442 (1957); Л. П. Горьков, ЖЭТФ 37, 835 (1959).
27. Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Strand, Phys. Rev. Letts. 9, 306 (1962); Phys. Rev. 131, 2486 (1963).
28. P. W. Anderson, Phys. Rev. Letts. 9, 309 (1962).
29. C. P. Bean, Phys. Rev. Letts. 8, 250 (1962).
30. K. M. Olsen, R. F. Jack, E. O. Fuchs, F. S. L. Hsu, в сб. Superconductors (Eds. M. Tanenbaum, W. V. Wright), Interscience Publ., New York, 1962, стр. 123.
31. E. Buchler, J. H. Wernick, K. M. Olsen, F. S. L. Hsu, J. E. Kunzler, в сб. Metallurgy of Advanced Electronic Materials (Eds. G. E. Brock), Interscience Publ., New York, 1963, стр. 105.
32. H. J. Levinstein, E. Buchler (в печати).
33. J. E. Kunzler, F. S. L. Hsu, E. Buchler, Bull. Amer. Phys. Soc. 6, 123 (1961).
34. H. R. Hart, Jr., J. S. Jacobs, G. L. Kolbe, P. E. Lawrence, в сб. High Magnetic Fields (Eds. H. Kolm, B. Lax, F. Bitter, R. Mills), John Wiley, New York, 1961, стр. 584.
35. J. K. Hulm, M. J. Fraser, H. Riemersma, A. J. Venturino, R. E. Wien, там же, стр. 332.
36. J. E. Kunzler, там же, стр. 574.
37. R. R. Hake, T. G. Berlincourt, D. H. Leslie, там же, стр. 341.
38. K. M. Olsen, E. O. Fuchs, R. F. Jack, J. Metals 6, 824 (1961).
39. J. J. Hanaak, G. D. Cody, P. R. Aron, H. C. Hitchcock, в сб. High Magnetic Fields (Eds. H. Kolm, B. Lax, F. Bitter, R. Mills), John Wiley, New York, 1961, стр. 592.
40. E. R. Schroeder, N. S. Freedman, J. C. Fakan, Appl. Phys. Letts. 4, 105 (1964).
41. В. Р. Карасик, Физика и техника сильных магнитных полей, М., Изд-во «Наука», 1964.