

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

Куйбышевский Ордена Трудового Красного
Знамени авиационный институт имени академика
С.П. Королева

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Утверждено редакционно-издательским
советом института в качестве методи-
ческих указаний к лабораторной рабо-
те по курсу "Криогенная электроника"

Куйбышев, 1989

УДК 538.945

В настоящих методических указаниях даны рекомендации по выполнению лабораторной работы. Приводятся необходимые сведения о высокотемпературных сверхпроводящих керамиках.

Составитель: Бояринцев В.И.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Эффект сверхпроводимости заключается в резком исчезновении электрического сопротивления вещества при конечной, отличной от 0°K температуре. Она называется критической температурой или температурой сверхпроводящего перехода и обозначается T_k .

I.I. Низкотемпературные сверхпроводники

В настоящее время известно более 1000 различных веществ, переходящих при понижении температуры в сверхпроводящее состояние. Характерно, что для каждого из них существует свое, особое значение T_k (табл. I).

Таблица I

Критические температуры металлических сверхпроводников

| Вещество | Nb | Pb | Hg | Ta | In | Al | Zn | W |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| T_k , K | 9,2 | 7,2 | 4,1 | 4,4 | 3,4 | 1,2 | 0,9 | 0,012 |

Самой высокой критической температурой среди чистых веществ обладает ниобий ($T_k=9,2$ K), самой низкой – вольфрам ($T_k=0,012$ K)

Критическая температура 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. Так, например, серое олово является полупроводником, а белое олово – металлом, причем каждая из модификаций характеризуется своей критической температурой (для серого олова $T_{kr} = 5,3$ K, для белого – $T_{kr} = 3,72$ K). Бериллий интересен тем, что он является сверхпроводником только в том случае, если образец приготовлен в виде тонкой пленки ($T_{kr} = 0,026$ K). Некоторые элементы становятся сверхпроводниками лишь при высоком давлении (например, барий становится сверхпроводником α $T_k = 5$ K под давлением 150кбар).

Из сказанного следует, что сверхпроводимость является свойством не отдельных атомов, а представляет собой коллективный эффект, связанный со структурой всего образца.

Можно было ожидать, что такие хорошие проводники, как медь, серебро, золото, у которых в обычном состоянии сопротивление и так мало, легче других веществ переходят в состояние сверхпроводимости. Однако на опыте наблюдается совершенно иная картина.

Именно в этих металлах сверхпроводимость не обнаружена.

Основную часть низкотемпературных сверхпроводников составляют не чистые вещества, а сплавы и соединения. Среди металлических соединений наивысшей критической температурой ($T_c=22,3\text{К}$) обладает сплав ниобия с германием Nb_3Ge . С 1973 года по 1986 год это значение критической температуры оставалось самым высоким. В 1986 году были открыты сверхпроводники, полностью теряющие сопротивление в жидком азоте ($T=77\text{К}$). Имеются сообщения в переходах, начинающихся при 230...250 К. Такие сверхпроводники были названы высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП).

1.2. Высокотемпературные сверхпроводники.

ВТСП представляют собой металлооксидные керамики типа La-Ba-Cu-O , Y-Ba-Cu-O и др. с различным процентным содержанием компонентов. Свойства ВТСП керамики зависят от технологии их приготовления.

1.2.1. Методики получения ВТСП.

В настоящее время известно более 10 различных методик получения сверхпроводящих керамик. Все они могут быть условно разделены на 2 группы: соосаждение из растворов и спекание порошков (хотя в методе соосаждения также применяется спекание).

Соосаждение из растворов. Химические реакции, необходимые для получения требуемого состава керамики, в этом случае осуществляются в жидкой фазе. Компоненты керамики получают из растворов соответствующих солей путем обработки их кислотами или щелочами. После этого осадок промывают водой, сушат, прокаливают при 900...1000°C на воздухе, тщательно размельчают, а затем пресуют в таблетки при давлении порядка 3 кбар. Иногда в этом методе применяются спекание при $T = 1100^\circ\text{C}$ и дополнительный отжиг в кислороде.

Спекание порошков. В этой методике смесь окислов La , Cu , Ba и др. в виде порошков спекается при 1100°C (для осуществления химической реакции в твердой фазе) на воздухе или в кислородной среде. Полученная смесь размельчается и пресуется. Готовый образец отжигается на воздухе или в кислороде.

1.2.2. Свойства ВТСП.

Кристаллическая структура, плотность. Образцы ВТСП имеют поликристаллическую структуру. В литературных источниках пока нет сведений о создании монокристаллических образцов новых керамик. Образцы, приготовленные по вышеизложенной технологии

имеет зернистую структуру. Типичный размер сверхпроводящих гранул - 1...10 мкм. Плотность керамики составляет 6,4...7,2 г/см³ в зависимости от состава.

Критические температуры. Лучшие значения температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние лежат в интервале 46...102К. Ширина перехода $T = 1,5...7$ К.

Температурная зависимость сопротивления. Величина удельного сопротивления ρ в керамиках при комнатной температуре составляет $(0,9...8)10^{-3}$ Ом·см, что на 2 порядка превышает величину ρ д. т. металлических ("низкотемпературных") сверхпроводников.

В температурной зависимости сопротивления R наблюдается как полупроводниковый, так и металлический ход. При этом характер зависимости $R(T)$ может быть прямо связан с методикой получения образцов. Как правило, металлический ход $R(T)$ указывает на более высокое качество образцов данного состава и соответствует более высоким T_k .

На рис. I приведены примеры перехода в сверхпроводящее состояние двух образцов керамики $La-Sr-Cu-O$. Кривая 1 (металлический ход зависимости $R(T)$) соответствует образцу, отожженному в кислороде, кривая 2 (полупроводниковый ход зависимости $R(T)$) - образцу, отожженному на воздухе.

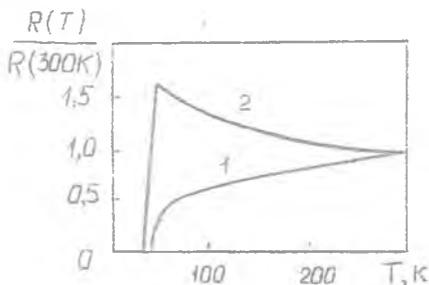


Рис. I

Величина ρ , измеренная на СВЧ, оказывается в несколько раз меньше, чем на постоянном токе.

Критические магнитные поля и критические токи.

По магнитным свойствам ВТСП близки к "низкотемпературным" сверхпроводникам 2-го рода. Основными отличительными особенностями ВТСП являются :

- 1) Наличие двух критических магнитных полей H_{K1} и H_{K2}
- 2) Эффект Мейснера отсутствует в полях, больших, чем H_{K1} . Величина H_{K1} в различных работах оценивалась от 80...100 Э до 600 Э, что близко к соответствующему значению H_{K1} для сверхпроводников 2-го рода ;
- 3) Верхнее критическое поле может достигать очень больших значений 10^6 Э.
- 4) Магнитное поле проникает внутрь образца в виде периодической решетки вихревых нитей.

На фазовой диаграмме ВТСП существуют 3 области (рис.2).

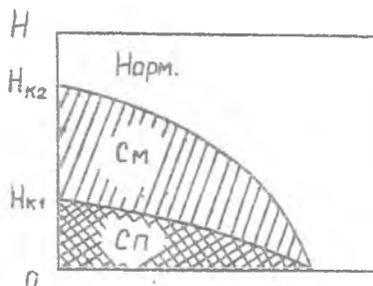


Рис. 2

- 1) Область СП - сверхпроводящего мейснеровского состояния при $H < H_{K1}$, при котором вытеснение магнитного поля из сверхпроводника происходит полностью (сверхпроводник I-го рода).
- 2) Область СМ - область смешанного состояния при $H_{K1} < H < H_{K2}$, при котором магнитный поток проникает в образец, приводя к образованию решетки из квантовых вихрей сверхпроводящего тока, несущих магнитный поток.
- 3) Область Норм - область нормального состояния при $H > H_{K2}$.

Критические токи в образцах ВТСП керамики на 2...3 порядка ниже, чем у лучших сверхпроводников 2-го рода.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное изучение основных свойств сверхпроводящего состояния ::

- отсутствия электрического сопротивления
- эффекта Мейснера (выталкивание магнитного поля из сверхпроводника)

- возникновения незатухающего тока в сверхпроводящем кольце.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Блок схема установки для измерения зависимости сопротивления ВТСП от температуры приведена на рис.3

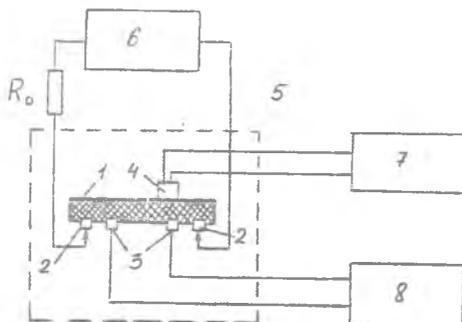


Рис. 3

- 1 - образец ВТСП керамики
- 2 - контакты для подвода тока к образцу
- 3 - токосъемные контакты
- 4 - датчик температуры
- 5 - сосуд Дьюара
- 6 - источник питания
- 7 - измеритель температуры
- 8 - микровольтметр

Измерения выполняются по стандартной четырехзондовой методике. С помощью контактов 2 к образцу 1 подводится ток от источника питания 6. При изменении температуры образца изменяется его сопротивление R обр и, следовательно, ток через образец. Однако, если выбрать величину $R_0 \gg R$ обр, то ток в цепи можно считать постоянным. Тогда напряжение между контактами 3 будет изменяться в зависимости от температуры T таким же образом, как и сопротивление образца. Температура образца измеряется с помощью датчика 4 и индикатора 7.

Наблюдение эффекта Мейсснера осуществляется с помощью образца ВТСП, подвешенного на нитке, и постоянного магнита.

Наличие незатухающего тока, наведенного в кольцеобразном сверхпроводнике полем постоянного магнита, индицируется при помощи магнитной стрелки компаса.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Измерение зависимости сопротивления ВТСП от температуры.

Установить величину тока через образец в пределах 10...15мА. Зафиксировать значения температуры образца и его сопротивления в нормальных условиях.

Произвести измерения сопротивления образца в интервале температур 300...77 К через каждые 20...25 К. Температура изменяется путем постепенного погружения штанги с закрепленными на ней образцом и датчиком температуры в сосуд Дьюара с жидким азотом.

Результаты измерений занести в таблицу.

| | | | | | | | | | | |
|-------|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|----|
| T, К | 300 | | | | | | | | | 77 |
| R, Ом | | | | | | | | | | |

4.2. Наблюдение эффекта Мейсснера.

Образец в форме диска, подвешенный на нитке, охладить путем погружения в жидкий азот и в сверхпроводящем состоянии поднести к постоянному магниту. При этом на поверхности образца возникает индукционный ток. Этот ток создает свое магнитное поле, которое компенсирует поле постоянного магнита таким образом, что внутри сверхпроводящего образца результирующее магнитное поле станет равным нулю. Следовательно, будет наблюдаться отклонение сверхпроводящего образца, подвешенного на нитке, от вертикального положения. Отклонение образца будет наблюдаться до тех пор, пока он находится в сверхпроводящем состоянии.

Демонстрация эффекта Мейсснера можно провести также следующим образом. Если к висящему на нитке образцу, который находится в сверхпроводящем состоянии, поднести снизу постоянный магнит в форме кольца, то при достаточной напряженности магнитного поля сверхпроводник начнет подниматься и "парить" над магнитом.

Эффект механического отталкивания сверхпроводника и постоянного магнита будет наблюдаться и в том случае, когда над сверхпроводящим образцом помещается постоянный магнит. Это явление получило шуточное название "гроб Магомета". (По преданию, гроб с телом пророка Магомета висел в пространстве без всякой поддержки извне).

4.3. Наблюдение незатухающего тока в сверхпроводящем кольце.

К кольцеобразному образцу при температуре выше критической поднести постоянный магнит так, чтобы в отверстии кольца создать магнитное поле. После этого кольцо и магнит охлаждаются в этом положении до температуры жидкого азота. Затем постоянный магнит удаляется.

Согласно закону сохранения магнитного потока в кольце возникает ток соответствующего направления. Этот ток создает магнитное поле, поток которого через отверстие кольца в точности равен потоку магнитного поля от постоянного магнита. Таким образом, в сверхпроводнике оказывается "замороженным" магнитный поток. Измеряя изменения магнитного поля кольца с течением времени, можно убедиться в том, что сверхпроводящий ток в кольце не затухает, если кольцо находится в сверхпроводящем состоянии.

Для качественного контроля тока в кольце к нему подносят магнитную стрелку компаса. При перемещении кольца стрелка компаса поворачивается.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема измерения сопротивления образца ВТСП.
2. Экспериментальные данные в виде таблицы и графика зависимости сопротивления образца от температуры.
3. Результаты наблюдений эффекта Мейсснера и незатухающего тока в кольце.
4. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сверхпроводимость ?
2. В чем различие между "высокотемпературными" и "низкотемпературными" сверхпроводниками ?
3. Какими методами получают ВТСП ?
4. Перечислите основные свойства ВТСП.
5. Каковы отличительные особенности магнитных свойств ВТСП ?

6. Объясните фазовую диаграмму ВТСП.
7. Что такое эффект Мейсснера ?

Л и т е р а т у р а

1. Епифанов Г.Н., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА: Учебное пособие для ВУЗов. -М.:Сов. радио, 1979 - 352 с.
2. А.И.Головашкин. Высокотемпературные сверхпроводящие керамики (обзор экспериментальных данных). - Успехи физических наук, том 152, вып.4, с.558...573.

Подписано в печать 10.10.89.
Формат 60 х 84 1/16. Бумага белая офсетная.
Усл.п.л. 0,75 Уч.-изд.л. 0,75 Т.100 экз.
Заказ № 16 Бесплатно.

Уч-я оперативной полиграфии КуАИ,
Куйбышев, Ульяновская, 18.