

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

## ФИЗИКА

Выполнил: Дебуля Богдан Андреевич, ученик 11 класса «А»  
МБОУ-лицей № 28 г. Орёл

### ***Руководитель:***

*Островецкая Светлана Константиновна*  
учитель физики, ВКК, МБОУ-лицей № 28 г. Орла имени дважды Героя  
Советского Союза Г.М. Паршина

**Сверхпроводимость** — свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько десятков чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость — квантовое явление. Оно характеризуется также эффектом Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как идеальная проводимость в классическом понимании.

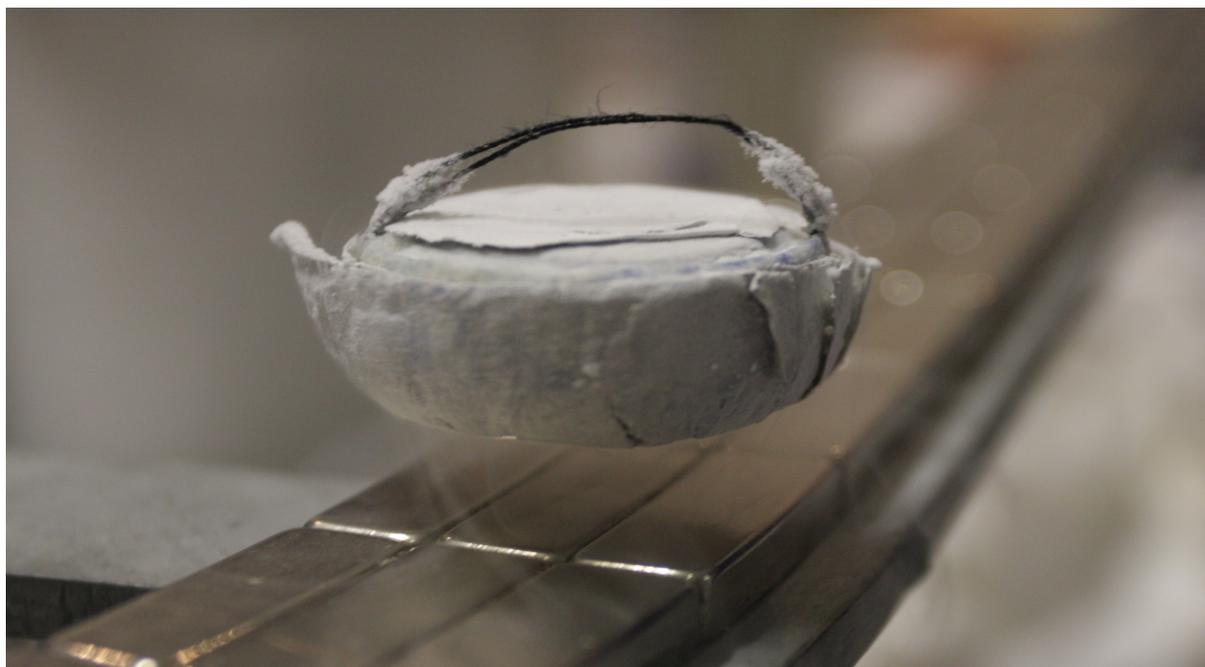
Открытие в 1986—1993 гг. ряда высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило и практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия (4,2 К), но и при температуре кипения жидкого азота (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости.

В 1911 году голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости, проводя измерения электрического сопротивления ртути при очень низких температурах и обнаружив почти мгновенное исчезновение сопротивления при температуре ниже 4,15 К.

Электрический ток – это движение заряженных частиц, то есть поток электронов в твердых телах. Внешние электроны называются валентными. Они отрываются от атомов, когда те объединяются в твердое тело, образуют газ почти свободных электронов. Если создать электрическое поле (приложить напряжение), в электронном газе возникнет ветер как бы под действием разности давлений. Этот ветер и есть электрический ток.

Сверхпроводимость обнаружена у ртути, олова, свинца, ниобия, ванадия, алюминия, тантала, таллия, урана, сплавах ртути с золотом и оловом. Для наблюдения этого явления нужно охлаждать металлы до низких температур. Образец должен охлаждаться постоянно, для чего его помещают в охлаждающую жидкость. Все жидкости при низких температурах замерзают, отвердевают. Поэтому ожижают вещества, которые при комнатных условиях являются газами. Азот и гелий применяют для охлаждения, эти вещества нейтральны и безопасны.

Даже более важным свойством сверхпроводника, чем нулевое электрическое сопротивление, является так называемый эффект Мейснера (рисунок 1), заключающийся в том, что постоянное не слишком сильное магнитное поле выталкивается из сверхпроводящего образца. В толще сверхпроводника магнитное поле ослабляется до нуля, сверхпроводимость и магнетизм можно назвать как бы противоположными свойствами. Эффект Мейснера демонстрирует опыт, проведенный впервые советским физиком В.К. Аркадьевым в 1945 году: постоянный магнит парит над сверхпроводящей чашечкой. В сверхпроводнике возникают выталкивающие магнитное поле токи, их магнитное поле отталкивает постоянный магнит и компенсирует его вес.



**Рисунок 1. Эффект Мейснера.**

Сверхпроводники делятся на два больших семейства: сверхпроводников I типа (к ним, в частности, относится ртуть) и II типа (которыми обычно являются сплавы разных металлов). Переход вещества в сверхпроводящее состояние сопровождается изменением его тепловых свойств. Однако, это изменение зависит от рода рассматриваемых сверхпроводников. Так, для сверхпроводников I рода в отсутствие магнитного поля при температуре перехода  $T_c$  (температура перехода в сверхпроводящее состояние) теплота перехода (поглощения или выделения) обращается в нуль, а следовательно терпит скачок теплоёмкость, что характерно для фазового перехода II рода. Такая температурная зависимость теплоёмкости электронной подсистемы сверхпроводника свидетельствует о наличии энергетической щели в распределении электронов между основным состоянием сверхпроводника и уровнем элементарных возбуждений. Когда же переход из сверхпроводящего состояния в нормальное осуществляется изменением приложенного магнитного поля, то тепло должно поглощаться (например, если образец теплоизолирован, то его температура понижается). А это соответствует фазовому переходу I рода. Для сверхпроводников II рода переход из сверхпроводящего в нормальное состояние при любых условиях

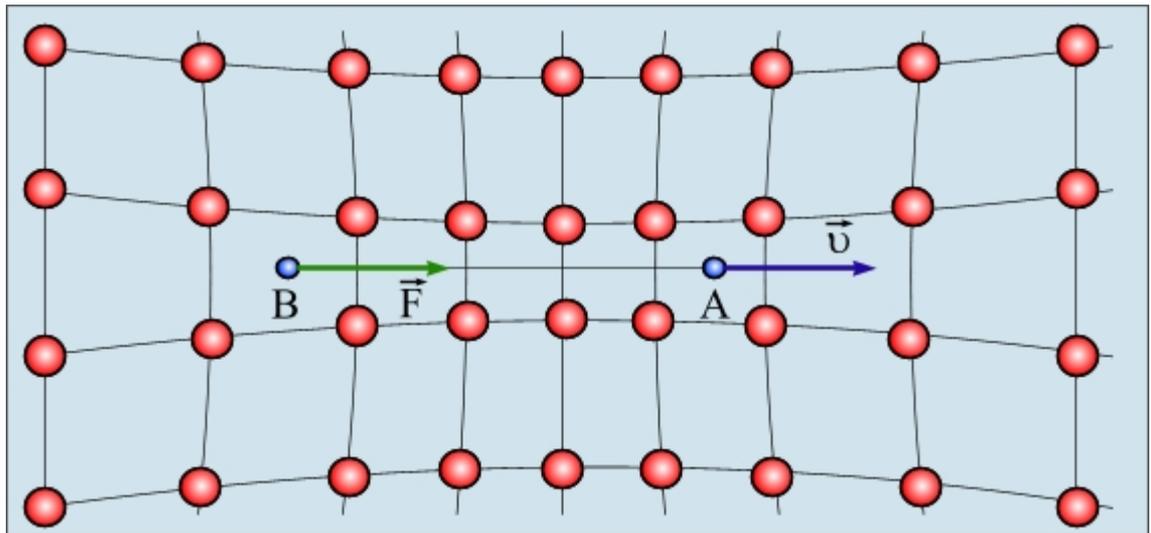
будет фазовым переходом II рода. В сверхпроводнике II рода самопроизвольно появляются вихревые токи, ориентированные параллельно внешнему магнитному полю. Подобно атомам кристалла, вихри образуют правильную решетку. Вихри появляются тогда, когда включается поле, и «входить» или «выходить» из образца могут только через «боковую» поверхность. При дальнейшем увеличении напряженности количество вихрей увеличивается, а расстояние между ними уменьшается, то есть магнитное поле как бы сжимает решетку вихрей – пока она не разрушится, тогда вихри сольются и произойдет переход в нормальное состояние. Только в этот момент исчезает сверхпроводимость.

Твердое тело, проводящее электрический ток, представляет собой кристаллическую решетку, в которой могут двигаться электроны. Решетку образуют атомы, расположенные в геометрически правильном порядке, а движущиеся электроны – это электроны с внешних оболочек атомов. Поскольку поток электронов и есть электрический ток, эти электроны называются электронами проводимости. Если проводник находится в нормальном (несверхпроводящем) состоянии, то каждый электрон движется независимо от других. Способность любого электрона перемещаться и, следовательно, поддерживать электрический ток ограничивается его столкновениями с решеткой, а также с атомами примесей в твердом теле. Чтобы в проводнике существовал ток электронов, к нему должно быть приложено напряжение; это значит, что проводник имеет электрическое сопротивление. Если же проводник находится в сверхпроводящем состоянии, то электроны проводимости объединяются в единое макроскопически упорядоченное состояние, в котором они ведут себя уже как «коллектив»; на внешнее воздействие реагирует также весь «коллектив». Столкновения между электронами и решеткой становятся невозможными, и ток, однажды возникнув, будет существовать и в отсутствие внешнего источника тока (напряжения). Сверхпроводящее состояние возникает скачкообразно при температуре, которая называется температурой перехода. Выше этой

температуры металл или полупроводник находится в нормальном состоянии, а ниже ее – в сверхпроводящем. Температура перехода данного вещества определяется соотношением двух «противоположных сил»: одна стремится упорядочить электроны, а другая – разрушить этот порядок. Например, тенденция к упорядочиванию в таких металлах, как медь, золото и серебро, столь мала, что эти элементы не становятся сверхпроводниками даже при температуре, лежащей лишь на несколько миллионных кельвина выше абсолютного нуля. Абсолютный нуль (0 К,  $-273,16^{\circ}\text{C}$ ) – это нижняя граница температуры, при которой вещество теряет все свое тепло. Другие металлы и сплавы имеют температуры перехода в диапазоне от 0,000325 до 23,2 К. В 1986 были созданы сверхпроводники из керамических материалов с необычайно высокой температурой перехода. Так, для образцов керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  температура перехода превышает 90 К.

Объяснить явление сверхпроводимости с точки зрения классической электродинамики невозможно. Только с развитием квантовой физики в 1957 году (спустя 46 лет после открытия!) три американских физика - Бардин, Купер и Шриффер, объяснили сверхпроводимость спариванием электронов, то есть образованием куперовских пар, которое осуществляется за счет обмена колебаниями кристаллической ячейки – фононами.

Образование куперовских пар представлена на упрощенной модели прохождения тока в сверхпроводнике (рисунок 2). Красными кружками обозначены положительные ионы кристаллической решетки.



**Рисунок 2. Модель прохождения тока в сверхпроводнике.**

Когда электрон А под действием электрического поля движется в пространстве решетки, он немного искривляет её. В результате концентрация положительных ионов за ним возрастает. Скопление положительных ионов притягивает отрицательный электрон В с силой  $F$ . В результате энергия, которую потратил электрон А на прохождение ионной кристаллической решетки, передается через колебания решетки электрону В. Получается, что электроны А и В связаны между собой через ионную решетку, образуют пару и вместе не тратят энергии при движении. Сопротивление току в этом случае равно нулю.

Эффект Джозефсона - протекание сверхпроводящего тока через тонкую изолирующую или несверхпроводящую прослойку между двумя сверхпроводниками (джозефсоновский контакт). При пропускании через джозефсоновский контакт достаточно слабого тока напряжение на контакте отсутствует, то есть ток является чисто сверхпроводящим (джозефсоновский ток). Его существование связано с неполным разрушением куперовских пар электронов при их прохождении через очень тонкую несверхпроводящую прослойку. Такой режим называется стационарным эффектом Джозефсона. При увеличении тока через контакт и достижении им некоторой величины  $I_C$  на контакте возникает напряжение. Значение критического джозефсоновского тока  $I_C$  зависит от свойств контакта, температуры и

магнитного поля. Ток  $I_C$  складывается из тока сверхпроводящих (спаренных) электронов, который теперь становится переменным (его частота зависит от напряжения на контакте), и тока, обусловленного прохождением через прослойку нормальных (несверхпроводящих) электронов. Режим при токе  $I_C$  наз. нестационарным эффектом Джозефсона.

### **Применение сверхпроводников**

Современная наука уже получила материалы, которые обладают сверхпроводимостью при 165К (минус 107<sup>0</sup>С). Если будут получены материалы обладающие сверхпроводимостью при комнатной температуре, это будет огромный скачок в развитии человечества. Ведь одну треть электроэнергии мы тратим во время её передачи от источника потребителю. Пока же сверхпроводники приходится охлаждать жидким азотом.

С другой стороны, без них уже трудно представить работу Большого адронного коллайдера в ЦЕРНе, и строительство термоядерного реактора ITER в Кадараше.

На основе этого явления уже созданы поезда на магнитной подушке (рисунок 3), которые могут разгоняться до скорости 500 км/ч.



**Рисунок 3. Поезд на магнитной подушке**

Мощные магниты на сверхпроводниках используют в медицине при создании томографов, использующем принцип ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Сканирование тканей человека позволяет врачам увидеть на экране компьютера срез внутренностей, не оперируя больного. Такой метод позволяет быстро поставить правильный диагноз, а значит быстрее вылечить пациента.

Основанные на скивдах (основан на эффекте Джозефсона) датчики магнитного поля широко применяются в геофизике для измерения колебаний магнитного поля Земли.

В настоящее время разрабатывается новая технология цифровых устройств на основе сверхпроводников – технология устройств быстрой одноквантовой (БОК) логики, которая по-английски называется rapid single flux quantum (RSFQ) logic.

### Список литературы

1. Брандт Н.Б. Сверхпроводимость // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 1. С. 100–107.
2. Ван Дузер Т., Тернер Ч.У. Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. М.: Радио и связь, 1984.
3. Гинзбург В.Л., Андрюшин Е.А. Сверхпроводимость. М.: Педагогика, 1990.
4. Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М.: Изд-во МГУ, 1980.
5. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 1982.