

Физические основы сверхпроводимости

Лекция № 4



Хейке Камерлинг-Оннес (21.09.1853-21.02.1926) – голландский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по физике 1913 года «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия».

В 1911 году обнаружил, что при 4,15 Кельвинах (около -270 C) электрическое сопротивление ртути практически равно нулю.

Это явление получило название СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. Камерлинг-Оннес заслужил у коллег почётное прозвище «Господин Абсолютного Нуля».

- * В 1911 году, в Голландии, в лаборатории низких температур Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Он замораживал в жидком гелии ртуть и пропускал через нее электрический ток.
- * По мере снижения температуры, сопротивление ртути убывало. Как только температура опустилась до 4,12 К, ее сопротивление резко упало до нуля, оно совсем исчезло.
- * Вот слова самого Камерлинг-Оннеса: «Таким образом, при 4,12 градусов выше абсолютного нуля, ртуть переходит в новое состояние, которое можно назвать «сверхпроводящим»».

- * Сверхпроводимость - это квантовое явление, при котором течение электрического тока в материале происходит без диссипации энергии.
- * Характеризуется падением до нуля электрического сопротивления при охлаждении сверхпроводника ниже определенной температуры, которая называется температурой сверхпроводящего перехода (T_c) и определяется для каждого конкретного материала

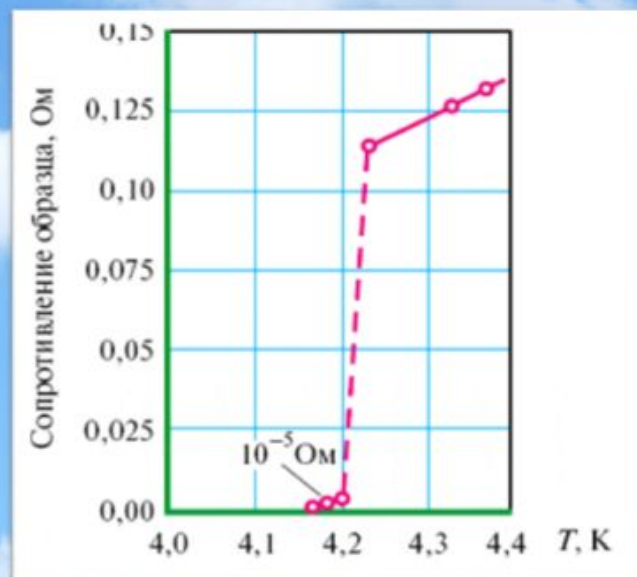
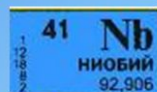
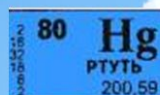
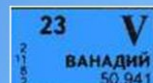


Рисунок 1 – Рисунок скопирован с одной из первых работ Камерлинг–Оннеса, посвященной сверхпроводимости.

По современным данным, график надо сдвинуть на 0,05 К – у Камерлинг–Оннеса была неточная шкала температур.

* По закону Джоуля - Ленца количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока по проводнику, возрастает пропорционально его длине и электрическому сопротивлению, что приводит к огромным потерям, например в сегодня используемых медных и алюминиевых проводах из-за существенного электрического сопротивления. Если сделать провода из сверхпроводящего материала, то можно минимизировать электрические потери.



Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

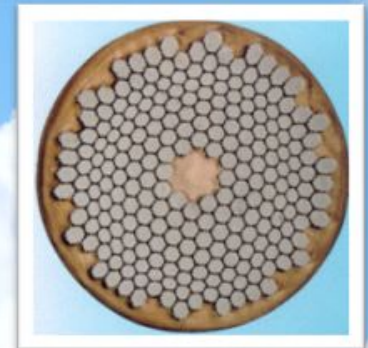
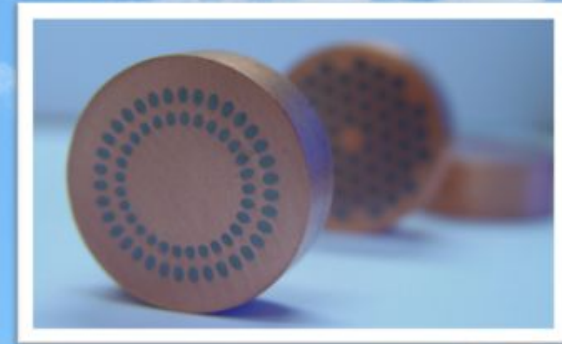
Например, к сверхпроводникам относятся: алюминий, свинец, ртуть, тантал, ванадий, ниобий, олово, сплав ртути с золотом и оловом и т.д..

Классификация сверхпроводящих материалов

1. По отклику на магнитное поле: сверхпроводники I рода (это чистые вещества, у которых наблюдается полный эффект Мейснера); сверхпроводники II рода (это вещества, в которых эффект Мейснера проявляется частично);

2. По их критической температуре: низкотемпературные (ниже температуры кипения азота) и высокотемпературные;

3. По материалу: чистый химический элемент, сплавы, керамика, сверхпроводники на основе железа, органические сверхпроводники и т. п.



* Температура перехода проводника в сверхпроводящее состояние T_c у каждого вещества своя. Например: алюминий (1,18 K), свинец (7,26 K), ртуть (4,15 K), тантал (4,38 K), ванадий (5,30 K), ниобий (9,20 K), олово (3,69 K).

* Для наблюдения явления сверхпроводимости нужно охлаждать металлы до низких температур. Причем образец должен охлаждаться постоянно, для чего его необходимо поместить в охлаждающую жидкость.

* Все жидкости при низких температурах замерзают, поэтому в качестве охладителя применяют сжиженные газы (гелий, водород

* По температуре перехода в сверхпроводящее состояние

* А) Низкотемпературные (T_c ниже 77 K).

* В низкотемпературных сверхпроводниках электроны взаимодействуют через фононы - кванты тепловых колебаний положительно заряженных ионов, составляющих кристаллическую решетку металла.

* Ее искажение, возникающее при прохождении одного электрона, через несколько микросекунд оказывает влияние на его партнера. Таким образом, при испускании и поглощении фононов между электронами возникает слабое взаимное притяжение

Виды сверхпроводников и их свойства

- * Б) Высокотемпературные (T_c от 77 до 135 К).
- * Все известные в настоящее время высокотемпературные сверхпроводники являются оксидами, большинство из которых содержат медь, но имеются также и соединения без меди.
- * Особое значение в оксидных высокотемпературных сверхпроводниках имеет состояние кислородной подрешетки, т.е. концентрация, структурное положение и подвижности атомов кислорода в кристаллической структуре. Это вызвано тем, что с кислородом в оксидных сверхпроводниках связывают как понимание природы высокотемпературной сверхпроводимости, так и объяснение нестабильности свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

* Виды сверхпроводников и их свойства

* В) Комнатные (293 K).

* Отдельные зерна графита могут проявлять сверхпроводящие свойства при комнатной температуре после обработки водой и выпекания в печи, что говорит о возможности достижения сверхпроводимости в нормальных условиях на практике. Но пока что в этой области сделано очень мало открытий.

* 2. По магнитным свойствам: (см. Приложение 2)

* А) Сверхпроводники I рода.

* Сверхпроводниками I рода являются все чистые металлы, кроме переходных. Для сверхпроводников I рода характерны скачкообразный переход в сверхпроводящее состояние и наличие одной критической напряженности магнитного поля, при которой наблюдается этот переход. Значения критической температуры и критической напряженности магнитного поля у них малы, что затрудняет их практическое применение.

* Для сверхпроводников I рода характерным является проявление эффекта Мейснера.

- * Б) Сверхпроводники II рода.
- * Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Они переходят в сверхпроводящее состояние в некотором интервале температур. Значения критической температуры и напряженности у них меньше. В таких сверхпроводниках токи не вытесняются на поверхность образца, а образуют цилиндрические каналы, пронизывающие весь объем. В центре канала куперовских пар нет, и сверхпроводимость отсутствует. При возрастании магнитного поля нити, расширяясь, сближаются и сверхпроводящее состояние разрушается. Достаточно сильные магнитные поля, которые способны выдерживать эти сверхпроводники, позволяют использовать их в различного типа устройствах для создания сильного магнитного поля.

* Виды сверхпроводников и их свойства

- * Для постоянного электрического тока электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю;
- * Постоянный ток в сверхпроводнике не нуждается в присутствии электрического поля, электрическое поле в сверхпроводнике равно нулю;
- * В сверхпроводниках магнитное поле ослабляется до нуля, они являются идеальными диамагнетиками;
- * Постоянное не слишком сильное магнитное поле выталкивается из сверхпроводящего образца (эффект Мейснера).

* Основные свойства сверхпроводников

* Наиболее важным свойством сверхпроводникового материала является так называемый эффект Мейснера (рисунок 2), заключающийся в вытеснении постоянного магнитного поля из сверхпроводника.

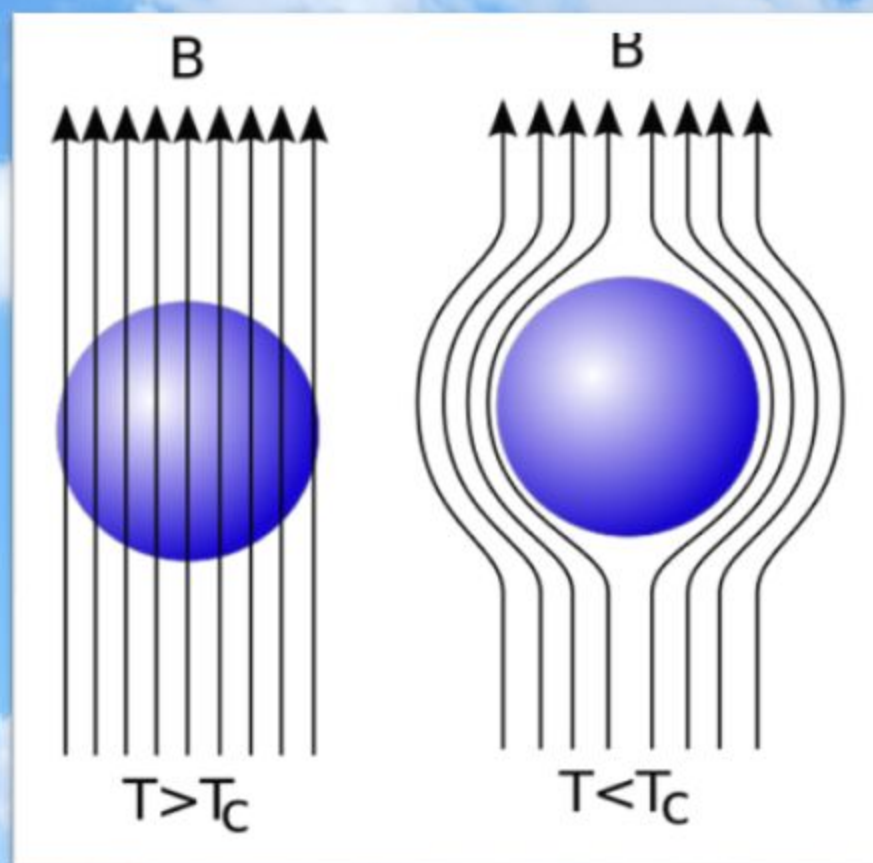


Рисунок 2 - Эффект Мейснера

Эффект Мейснера заключается в вытеснении постоянного магнитного поля из сверхпроводника.

* 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.

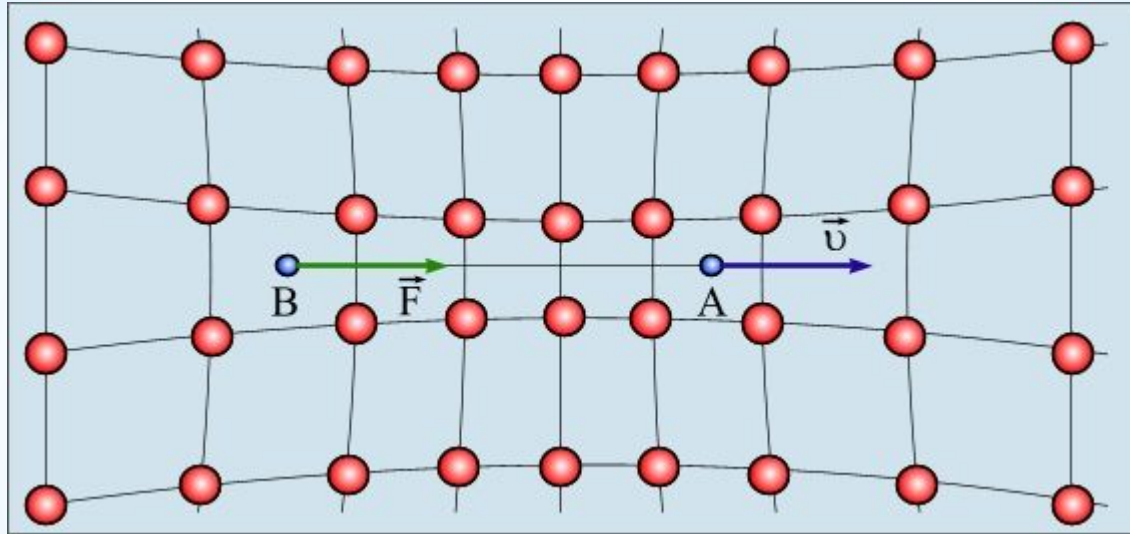
* Главной причиной возникновения явления сверхпроводимости является взаимодействие пар электронов с ионами кристаллической решетки.

* Квантовую теорию сверхпроводимости разработали в 1957 г. американские ученые Джон Бардин, Леон Купер и Джон Роберт Шриффер, за что в 1972 г. получили Нобелевскую премию по физике.

*** Квантовая теория сверхпроводимости**

* В наше время в технике в качестве сверхпроводника чаще всего применяется сплав титана и ниобия, который переходит в состояние сверхпроводимости при 10 К. Но поиски более «высокотемпературных» сверхпроводников открывают новые перспективы. Японские ученые создали наиболее эффективный на сегодняшний день сверхпроводник, который со временем может стать основанием глобальной научно-технической революции. Они получили вещество — диборид магния (соединение магния с бором), которое становится сверхпроводимым при рекордно высокой температуре для металлов 43 К (-230°C).

- * Прогресс в получении сверхпроводимых материалов возможен в таких направлениях:
- * передача электроэнергии на большие расстояния без заметных потерь;
- * создание транспорта больших скоростей на магнитной подушке;
- * создание мощных магнитных систем;
- * разработка сверхчувствительных диагностических приборов и др.
- * Из примера исследования сверхпроводимости можно убедиться, что физика еще далеко не исчерпала своих возможностей в новой технике и технологиях.

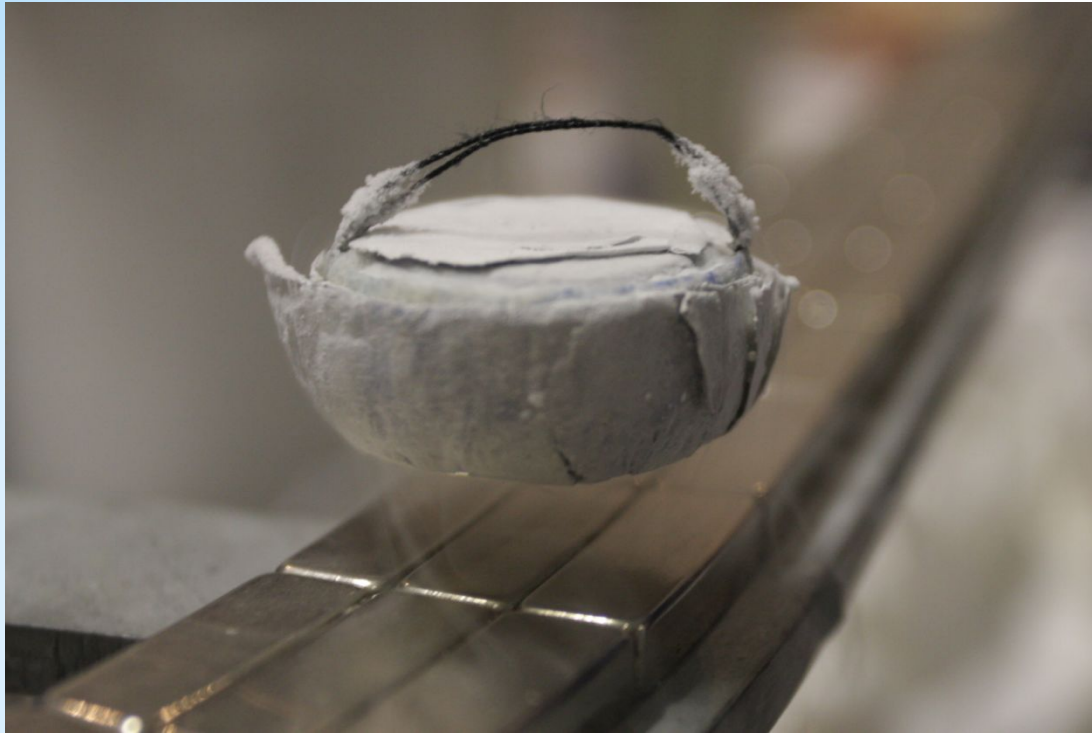


Чтобы понять, как образуются куперовские пары, рассмотрим очень упрощенную модель прохождения тока в сверхпроводнике.

Красными кружками обозначены положительные ионы кристаллической решетки.

* 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.

*Сверхпроводимость характеризуется также эффектом Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. В результате образец, как видно на фото, зависает над магнитом.



* Сверхпроводимость характеризуется также эффектом Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. В результате образец, как видно на фото, висит над магнитом ●

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



* Современная квантовая теория сверхпроводимости принципиально не ограничивает значение температуры, при которой наблюдается этот эффект. Значит дело за созданием новых материалов и соединений, которые, возможно, в скором будущем откроете вы.