

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Аксенов ЭМ-31

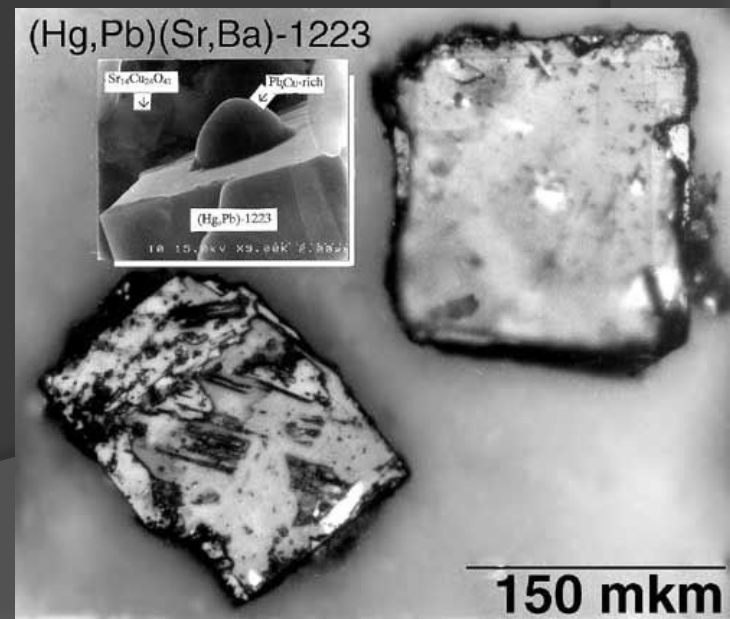
# История открытия

В 1911 году голландский физик Хейле Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление – *сверхпроводимость*. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко падает до нуля. Позже было открыто много других сверхпроводников:

- 1912: свинец и олово.
- 1919: таллий и уран.

В 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость. Получены сложные оксидные соединения лантана, бария, и других элементов с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100 К. Это выше температуры кипения жидкого азота при атмосферном давлении. Высокотемпературная сверхпроводимость в недалёком будущем приведёт, наверняка, к новой технической революции во всей электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ.

Рис.1



# Сверхпроводимость

**Сверхпроводимость** — свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения. Известны несколько десятков чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем устранить источник электрического тока, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго. В обычном же несверхпроводящем проводнике электрический ток в этом случае прекращается.

# Высокотемпературные полупроводники

Высокотемпературные сверхпроводники (высокие  $T_c$ ) — семейство материалов (сверхпроводящих керамик) с общей структурной особенностью, которую можно охарактеризовать относительно хорошо выделенными медно-кислородными плоскостями. Их также называют сверхпроводниками на основе купратов. Температура сверхпроводящего перехода, которая может быть достигнута в некоторых составах в этом семействе, является самой высокой среди всех известных сверхпроводников.

# Структура

Все основные ВТСП-системы имеют слоистую структуру. На рис.2 приведена для примера структура элементарной ячейки ВТСП-соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Обращает на себя внимание очень большая величина параметра решетки в направлении оси «с». Для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$   $c=11.7\text{\AA}$ .

Рис.2

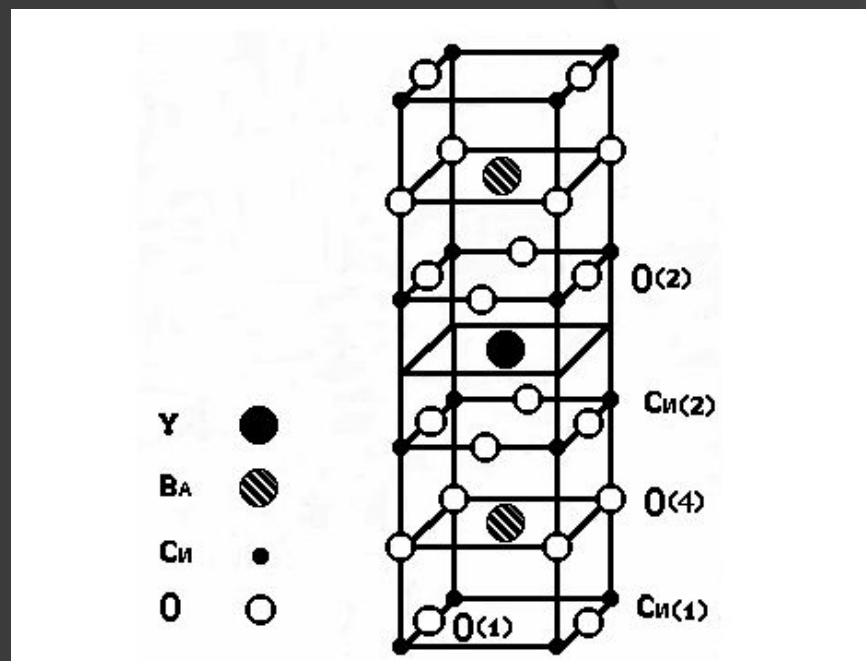
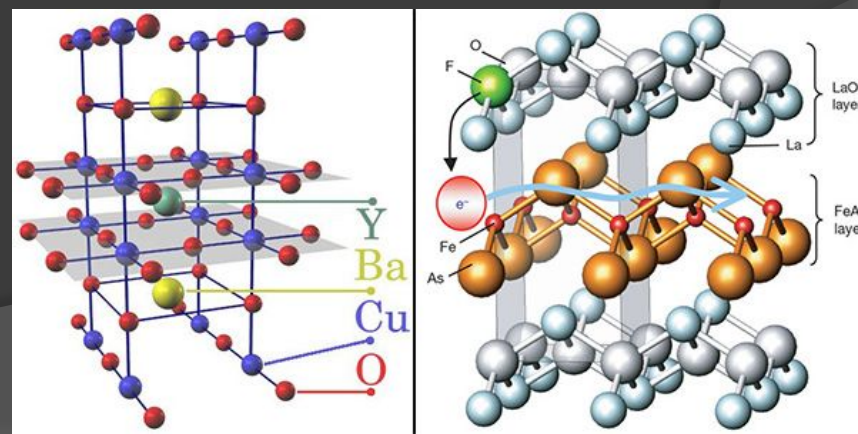


Рис.3



- Наблюдается значительная анизотропия многих свойств таких соединений. Как правило соединения с большими  $n$  - металлы (хотя и плохие) в плоскости « $ab$ », и обнаруживают полупроводниковое поведение в третьем направлении, вдоль оси « $c$ ». Но при этом они являются сверхпроводниками.
- В некоторых ВТСП-системах наблюдается сверхструктурная модуляция решетки, например, в системе  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_\delta$ . Имеется определенная корреляция  $T_c$  с периодом этой модуляции.

Еще более необычны структурные образования, наблюдавшиеся в ВТСП-системах, так называемые «страйпы». «Страйпы» представляют собой сверхструктурную модуляцию зарядовой плотности. Их период составляет несколько ангстрем. Как правило, это динамические образования и они проявляются в изменении некоторых свойств ВТСП. Однако при введении примесей они могут «запинниговаться» на этих дефектах и будут наблюдаться в статике.



# Температурная зависимость

## сопротивления $R(T)$

Во многих купратных ВТСП

$R(T)$  зависит практически линейно от температуры.

Пример для  $YBa_2Cu_3O_7$

приведен на рис. Это сопротивление измерено в плоскости “ab”.

Удивительно, что в чистых образцах экстраполяция этой зависимости в область низких температур ведет себя так, как будто остаточное сопротивление совершенно отсутствует

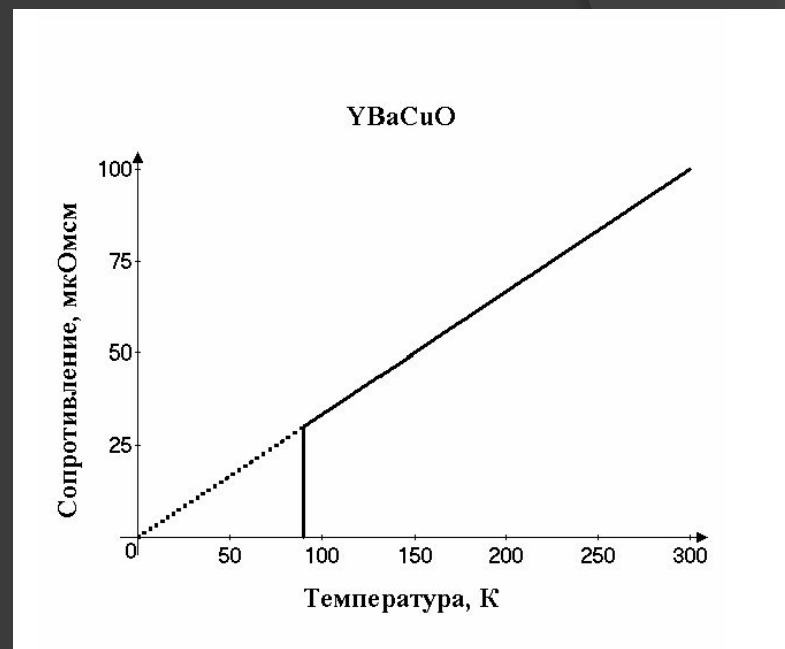


Рис.4

- В ряде других ВТСП, с меньшими  $T_c$ , где удается подавить сверхпроводимость магнитным полем, зависимость  $R(T)$  линейна вплоть до очень низких температур. Такая линейная зависимость наблюдается в очень широкой области температур: от  $\sim 10^{-3}$  до 600К. Это совершенно необычное поведение для металла. Данное явление не объяснено до сих пор

На рис. показана температурная зависимость сопротивления для ВТСП-соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  вдоль оси «с». Ход полупроводниковый, а наблюдаемая величина сопротивления приблизительно в 1000 раз больше.

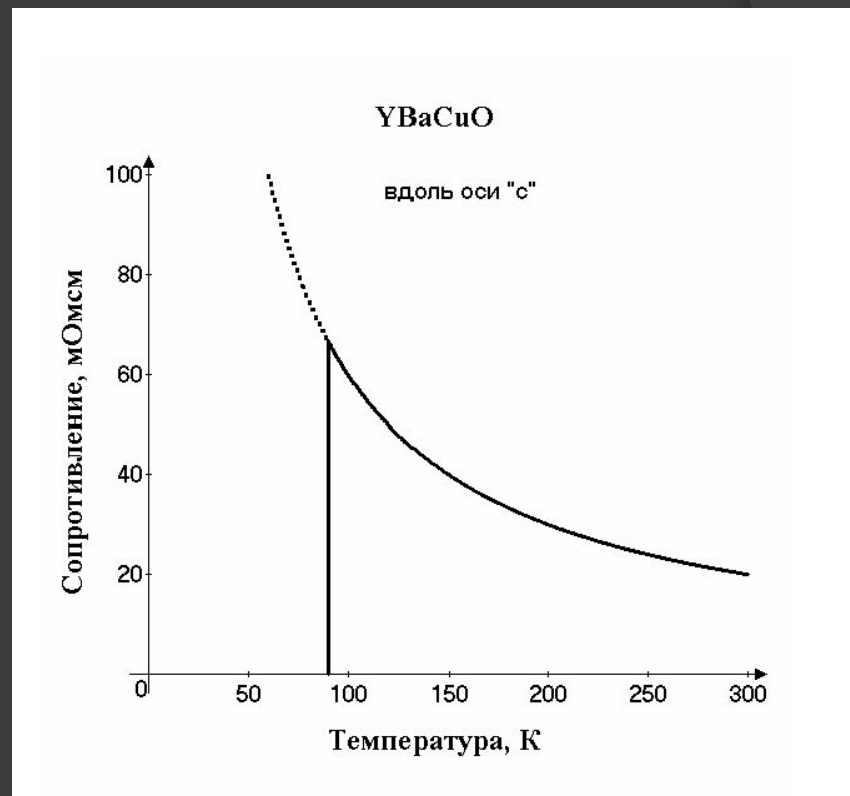
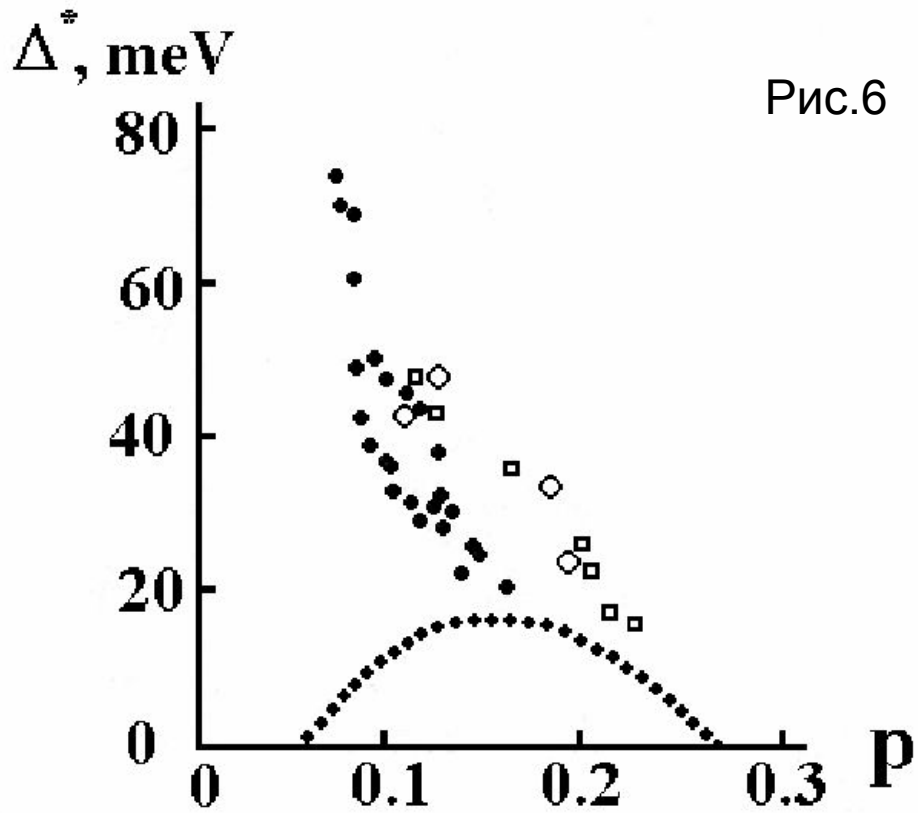


Рис.5

# Псевдощель

Еще одно уникальное явление, обнаруживаемое только в ВТСП, – псевдощель  $\Delta^*$ . При некоторой температуре  $T^* > T_c$  плотность состояний на поверхности Ферми перераспределяется: на части поверхности плотность состояний уменьшается. Ниже температуры  $T^*$  соединение существует в несколько необычном «нормальном» состоянии – состоянии с псевдощелью. Величина  $T^*$  при низком уровне легирования может достигать значений 300-600К для разных ВТСП-систем, т.е. сильно превосходить  $T_c$ . В области слабого легирования  $T^*$  падает с ростом уровня легирования, в то время как  $T_c$  растет.



Зависимость псевдощели  $\Delta^*$  от концентрации дырок для ВТСП-систем  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и  $\text{BiSrCaCuO}$  [4]. Величина псевдощели определялась по измерениям туннелирования (квадраты), теплоемкости (точки) и методом ARPES (ромбы). Пунктирная линия  $\Delta(p) = 5kT_c(p)$

# Фазовая диаграмма

Варианты типичной фазовой диаграммы ВТСП-купратов показаны на рис. В зависимости от концентрации носителей тока (как правило, дырок) в высокопроводящей плоскости  $\text{CuO}_2$  наблюдается целый ряд фаз и областей с аномальными физическими свойствами.

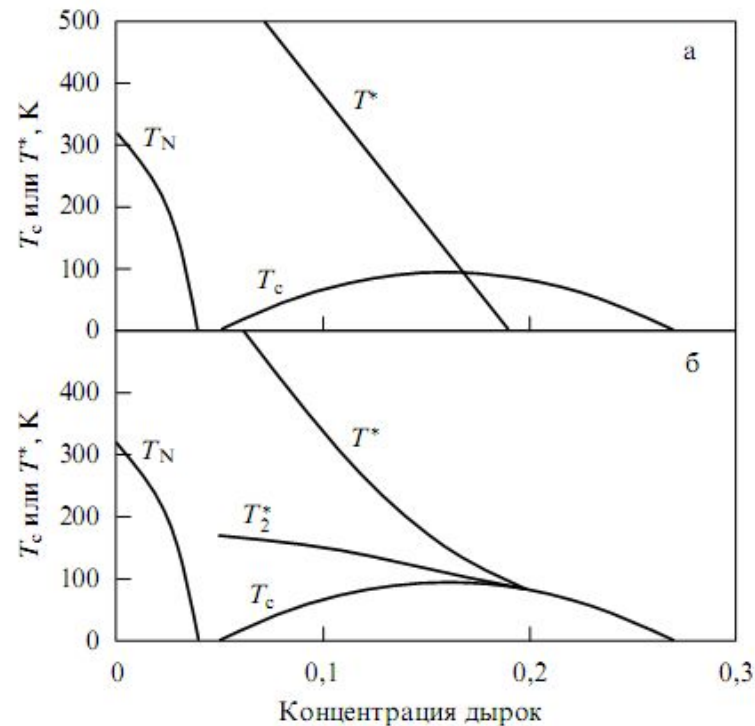
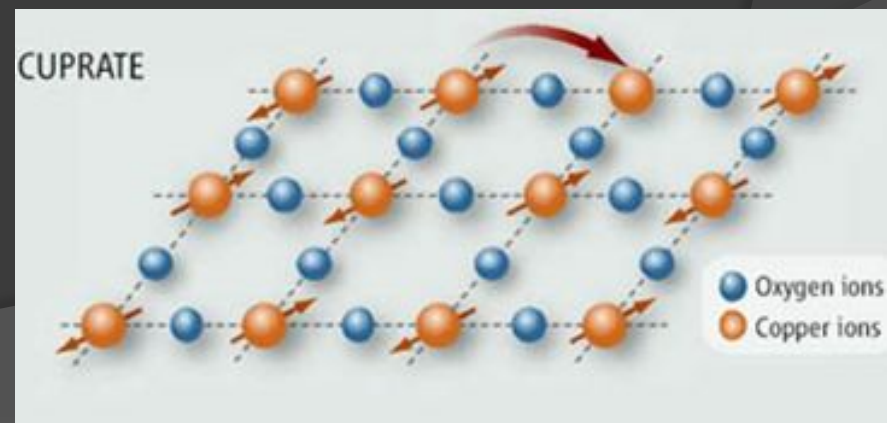


Рис.7

Рис.8



# Применение

Сверхпроводники находят широкое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. Ведь выделения теплоты в сверхпроводящей обмотке не происходит.

Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях электромагнитных частиц, магнитогидродинамических генераторах, преобразующих механическую энергию струи раскалённого ионизированного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.

Однако: 1. Получить сколь угодно сильное магнитное поле с помощью сверхпроводника нельзя. Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Поэтому для каждого проводника в сверхпроводящем состоянии существует критическое значение, превзойти которое, не нарушая сверхпроводящего состояния, нельзя.

2. Если бы удалось создать сверхпроводящие материалы при температурах, близких к комнатным, то была бы решена важнейшая техническая проблема – передача энергии по проводам без потерь.

3. Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано лишь в 1957 году американскими учёными Дж. Бардиным, Л. Купером, Дж. Шриффером и советским учёным, академиком Н. Н. Боголюбовым.



# Список литературы

- 1. Deutschei Cuy. Superconductivity gap and pseudogap // FNT,-2006,-v. 32,-№6.-p.740-745.
- 2. J.G.Bednorz, K.A.Muller , Rev. Mod. Phys.,- В, 64,- P.189-(1988).
- 3. Физические свойства высоко-температурных сверхпроводников. Под. ред. Д.М.Гинзберга. М.: «Мир», 1990, 544 С.
- 4. Садовский М.В. УФН 171 539 (2001) [Sadovskii M.V. Phys. Usp. 44 515 (2001)].
- 5. C. Renner et al. Phys. Rev. Lett. 80, 3606 (1998); S.H. Pan et al. Phys. Rev. Lett. 85, 1536 (2000).
- 6. Интернет: <http://ellphi.lebedev.ru/11/pdf10.pdf>
- <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/vtsp/12.html>

**Спасибо за внимание!**