

## СВЕРХПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Бычек Е.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Чаевский В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, доцент

Рассмотрена природа сверхпроводников на основе квантовых представлений, их основная классификация. Показаны области практического применения сверхпроводников.

Установлено, что сверхпроводники – это вещества, у которых при охлаждении ниже определенной критической температуры  $T_C$  электрическое сопротивление падает до нуля, т. е. наблюдается сверхпроводимость.

Существует несколько критериев для классификации сверхпроводников. Основные из них:

- по их отклику на магнитное поле: могут быть I рода, что значит, что они имеют единственное критическое значение магнитного поля  $H_C$ , выше которого теряют сверхпроводимость. Или II рода, подразумевающего наличие двух критических значений магнитного поля  $H_{C1}$  и  $H_{C2}$ . При приложении магнитного поля в этом диапазоне происходит частичное его проникновение в сверхпроводник с сохранением сверхпроводящих свойств;

- по их критической температуре: низкотемпературные, если  $T_C < 77$  К (ниже температуры кипения азота), и высокотемпературные;

- по материалу: чистый химический элемент (за исключением меди, серебра, золота, платины, щелочных, щелочноземельных и ферромагнитных металлов [1]), сплавы (например, NbTi), керамика (например, YBCO, MgB<sub>2</sub>), сверхпроводники на основе железа, органические сверхпроводники, графен и т. п.;

- молекулы органических веществ, содержащие π-электронную систему, являются миниатюрными сверхпроводниками, в которых π-электроны образуют связанные электронные пары [2].

Сверхпроводимость – квантовое явление. Оно характеризуется эффектом Мейснера-Оксенфельда, заключающимся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. Эффект Мейснера приводит ко многим интересным явлениям, например, левитации сверхпроводника в магнитном поле (преодоление гравитации, при котором субъект или объект «парит» в пространстве, не касаясь поверхности твердой или жидкой опоры) [3].

Впервые сверхпроводимость на микроскопическом уровне объяснили Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер. Центральным элементом их теории, получившей название теории БКШ, является концепция куперовской пары: коррелированного состояния электронов с противоположными спинами и импульсами. Л. Купер рассмотрел образование связанного состояния двух электронов, имеющих противоположные спины и скорости [4], и предположил, что эти пары могут быть ответственны за сверхпроводящее состояние. Он указал на возможность образования связанного состояния двух электронов на уровне Ферми при обмене фононами, которое качественно можно рассмотреть в виде динамического взаимодействия электронов проводимости с колебаниями ионной кристаллической решеткой. Куперовские пары, в отличие от отдельных электронов, обладают рядом свойств, характерных для бозонов, которые при охлаждении могут переходить в одно квантовое состояние. Можно сказать, что эта особенность позволяет парам двигаться без столкновения с решеткой и оставшимися электронами, т. е. без потерь энергии. На рисунке 1 показана схема движения куперовской пары в кристаллической решетке.

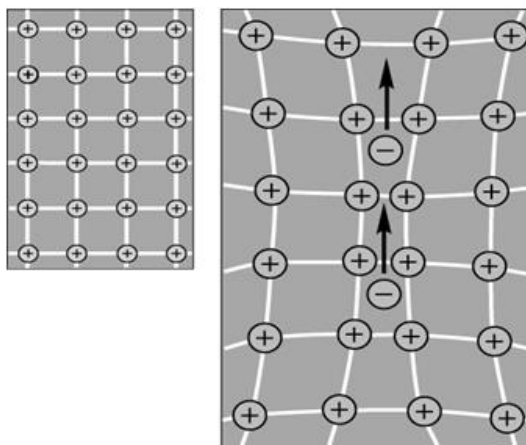


Рисунок 1 – Схема движения куперовской пары в кристаллической решетке

Электрон, движущийся в кристаллической решетке, как бы искажает ее (обусловлено

взаимодействием между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженными атомами решетки). Когда электрон пролетает рядом с ионами, он притягивает ионы и создает за собой положительную плотность заряда, которая притягивает другой электрон, противоположный по спину и скорости.

В настоящее время сверхпроводящие элементы являются неотъемлемой частью самых точных приборов для измерения малых напряжений и магнитных полей, без которых невозможно создать высокочувствительные детекторы излучений и сверхсильные магниты. На рисунке 2 показан снимок сверхпроводящего магнита – электромагнита, в котором ток, создающий магнитное поле, протекает в основном по сверхпроводнику, вследствие чего потери в обмотке сверхпроводящего магнита весьма малы.

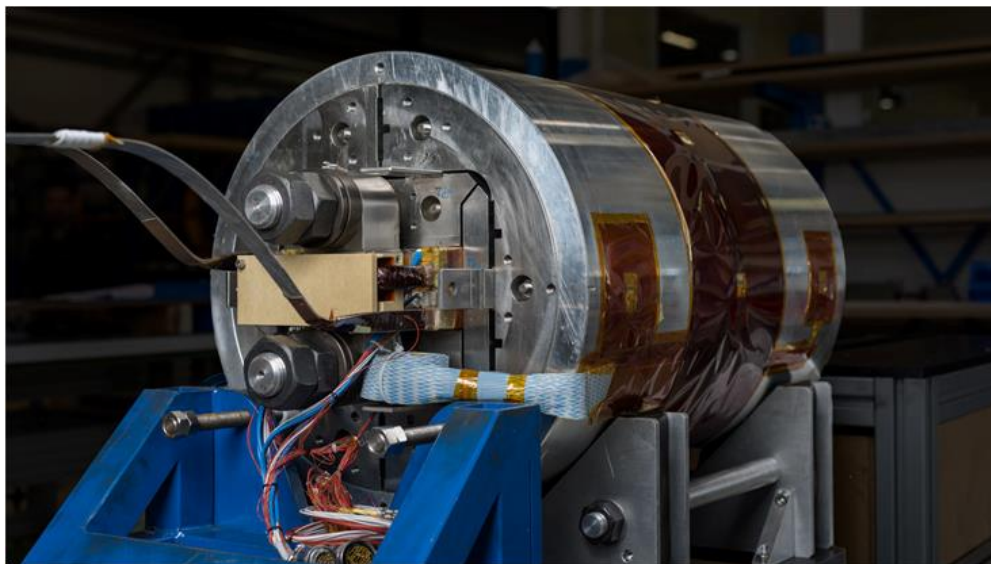


Рисунок 2 – Снимок сверхпроводящего магнита

К одной из основных сфер применения сверхпроводящих магнитов относятся медицинские установки магнитно-резонансной терапии и электроника. Использование сверхпроводящих магнитов в современных магнитно-резонансных томографах позволяют создавать более высокую напряженность магнитного поля, что позволяет повысить четкость изображения, уменьшить вес и габариты томографа.

1232 шт. сверхпроводящих дипольных магнитов используются в большом адронном коллайдере (БАК) – ускорителе заряженных частиц на встречных пучках, предназначенном для разгона протонов и тяжелых ионов и для изучения продуктов их соударений. В БАК для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков сверхпроводящие магниты расположены вдоль всего 27-километрового ускорительного кольца. Они были изготовлены с таким расчетом, чтобы при охлаждении до температуры 1,9 К держать ток 12 кА, создавая тем самым магнитное поле индукции 8,3 Тл, что отвечает протонам с энергией 7 ТэВ. Поэтому ток в обмотках циркулирует не затухая, и никаких потерь энергии при этом не происходит.

Явление сверхпроводимости используется в транспорте (сверхскоростные поезда на магнитной подушке), сверхпроводниковых генераторах (достоинства – высокий КПД, повышенная стабильность работы при использовании в электрических сетях, большая долговечность), в реакторах термоядерного синтеза для удержания плазмы (магнитная система Международного термоядерного реактора ИТЭР, состоящая из сорока восьми элементов). Сверхпроводимость используется в компьютерных технологиях, где сверхпроводящие элементы могут обеспечивать очень малые времена переключения, ничтожные потери мощности при использовании тонкопленочных элементов и большие объемные плотности монтажа схем [5].

Таким образом, сверхпроводники имеют широкий спектр применений, включая медицину, энергетику, транспорт, научные исследования и электронику, играют важную роль в развитии технологий и находят все большее применение в различных областях науки и промышленности.

**Список использованных источников:**

1. Значение сверхпроводимости в современном мире и в ближайшем будущем // *Energyland* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energyland.info/analytic-show-9615>. – Дата доступа: 08.02.2024.
2. Кресин, В.З. Сверхпроводимость и сверхтекучесть / В.З. Кресин. – М.: Наука, 1978. – 187 с.
3. Гинзбург, В.Л. Сверхпроводимость / В.Л. Гинзбург, Е.А. Андрюшин. – М.: Издательство «Альфа-М», 2006. – 112 с.
4. Cooper, Leon N. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas/ Leon N. Cooper // *Physical Review*, 1956. – Vol. 104, no. 4.– P. 1189 - 1190.
5. Применение сверхпроводников // *Постнаука* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://postnauka.ru/video/42800>. – Дата доступа: 08.02.2024.