



СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ

Акмырадова Гульалек

Преподаватель, Университет инженерных технологий Туркменистана имени
Огуз Хана
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

Сверхпроводимость — это квантовое явление, заключающееся в полном исчезновении электрического сопротивления и вытеснении магнитного поля из вещества при температурах ниже определённой критической точки. В статье подробно рассмотрены физические основы сверхпроводимости, включая микроскопические механизмы образования Куперовских пар, фазовые переходы в материалах, а также типология сверхпроводников первого и второго рода. Отдельное внимание уделено достижениям в области высокотемпературных сверхпроводников и перспективным исследованиям в данной области, а также прикладным аспектам, включая использование сверхпроводников в энергетике, медицине, транспорте и фундаментальных исследованиях. Освещены современные направления научного поиска, связанные с разработкой новых материалов, работающих при комнатной температуре, и созданием сверхпроводящей электроники.

Ключевые слова: сверхпроводимость, Куперовские пары, критическая температура, высокотемпературные сверхпроводники, магнитное поле, квантовые эффекты, BCS-теория, фазовый переход

1. Введение

Сверхпроводимость — это уникальное физическое явление, открытое Хейке Камерлинг-Оннесом в 1911 году, которое на протяжении более ста лет остаётся одной из центральных тем исследований в физике конденсированного состояния. С момента открытия эффекта полное исчезновение электрического сопротивления у ртути при температурах близких к абсолютному нулю вызвало большой интерес учёных, инженеров и технологов. Исследования показали, что сверхпроводимость характерна не только для простых металлов, но и для сложных соединений, а также керамических материалов.

Научное и технологическое значение сверхпроводимости трудно переоценить — оно проявляется как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладных областях, включая создание магнитно-резонансных томографов, токопроводящих кабелей, магнитов для ускорителей частиц, систем хранения энергии и элементов квантовых компьютеров. Несмотря на многолетние исследования, природа сверхпроводимости до сих пор остаётся областью активного научного поиска, особенно в отношении высокотемпературных сверхпроводников и их теоретического описания.

2. Физические основы сверхпроводимости

2.1 Явление сверхпроводимости

Сверхпроводимость проявляется в ряде уникальных физических свойств, первое из которых — полное отсутствие электрического сопротивления. Это означает, что если в замкнутом контуре, изготовленном из сверхпроводящего материала, возбудить ток, он будет протекать бесконечно долго без каких-либо потерь энергии. Вторым характерным свойством сверхпроводников является эффект Мейснера — полное вытеснение магнитного поля из объёма материала при переходе в сверхпроводящее состояние, что делает их идеальными диамагнетиками. Такой фазовый переход сопровождается изменением электронной структуры материала, и хотя макроскопически он наблюдается как исчезновение сопротивления, на микроуровне происходит формирование связанных электронных пар, способных двигаться сквозь кристаллическую решётку без рассеяния. При этом сверхпроводимость может быть разрушена воздействием магнитного поля, превышающего критическое значение, или при нагреве выше критической температуры, что возвращает материал в нормальное металлическое состояние.

2.2 Куперовские пары

Микроскопическая теория сверхпроводимости была предложена Бардином, Купером и Шриффером в 1957 году и получила название BCS-теории. Согласно этой модели, электроны с противоположными импульсами и спинами образуют слабосвязанные пары, которые называются Куперовскими. Эти пары движутся согласованно, подобно конденсату Бозе — Эйнштейна, и не рассеиваются на фононах — колебаниях кристаллической решётки, что обеспечивает полное исчезновение сопротивления. Образование Куперовских пар возможно только при достаточно низких температурах, когда тепловая энергия не разрушает эти слабые связи. В классических сверхпроводниках связи между электронами обеспечиваются обменом виртуальными фононами, однако в высокотемпературных сверхпроводниках механизм остаётся предметом дискуссий — предполагается участие спиновых или зарядовых флуктуаций.

2.3 Критическая температура

Критическая температура T_c — это температура, ниже которой материал переходит в сверхпроводящее состояние. Для классических сверхпроводников, таких как свинец, ниобий, олово, T_c составляет несколько Кельвинов. С открытием высокотемпературных оксидных сверхпроводников (например, купратов) стало возможным достигать сверхпроводящего состояния при температурах выше 90 К, что открыло путь к использованию жидкого азота в качестве дешёвого хладагента. На сегодняшний день известны материалы с T_c выше 200 К, полученные под высоким давлением, например, сероводородные гидриды. Важными характеристиками сверхпроводников являются также критическое магнитное поле и критическая плотность тока, которые определяют их применимость в различных условиях.

3. Типы сверхпроводников

3.1 Сверхпроводники первого рода

Сверхпроводники первого рода полностью вытесняют магнитное поле до определённого критического значения H_c . При превышении этого поля сверхпроводимость исчезает, и материал возвращается в нормальное состояние. К этому типу относятся простые металлы, такие как свинец, ртуть, олово. Эти материалы характеризуются относительно низкими значениями T_c и H_c , что ограничивает их использование в технологических приложениях. При охлаждении до сверхпроводящего состояния они демонстрируют резкий переход из нормального в сверхпроводящее состояние, без промежуточных фаз.

3.2 Сверхпроводники второго рода

Сверхпроводники второго рода обладают двумя критическими магнитными полями H_{c1} и H_{c2} . В диапазоне между ними в материале образуются вихревые состояния, когда магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде отдельных квантованных вихрей. Такие материалы, например, ниобий-олово и высокотемпературные купраты, способны сохранять сверхпроводимость при гораздо более высоких магнитных полях и токах, что делает их незаменимыми для создания мощных магнитов. Эти свойства определяют широкое использование сверхпроводников второго рода в технологиях и фундаментальных исследованиях.

4. Применение сверхпроводников

4.1 Энергетика

В энергетике сверхпроводимость используется для создания токопроводящих кабелей, трансформаторов и накопителей энергии. Сверхпроводящие линии позволяют передавать большие мощности без потерь на омическое сопротивление, что существенно повышает эффективность энергосистем. Сверхпроводящие магнитные накопители энергии (SMES) позволяют хранить избыточную энергию в виде магнитного поля и быстро отдавать её при необходимости. Эти системы важны для стабилизации сетей и сглаживания пиковых нагрузок.

4.2 Медицина

Одним из наиболее известных применений сверхпроводников является медицинская диагностика, в частности, магнитно-резонансная томография (МРТ). Сверхпроводящие магниты обеспечивают стабильные и мощные магнитные поля, необходимые для высокоточного сканирования тканей организма. Применение сверхпроводников позволяет создавать компактные и эффективные установки с минимальными затратами энергии. Кроме того, разрабатываются сверхпроводящие магнитные экраны для защиты пациентов и персонала от внешних магнитных помех.

4.3 Наука и техника

В фундаментальных исследованиях сверхпроводящие магниты используются в ускорителях частиц, например, в Большом адронном коллайдере, для создания сильных магнитных полей, необходимых для отклонения и фокусировки пучков. Сверхпроводящие квантовые интерференционные устройства (SQUID) позволяют измерять сверхслабые магнитные поля, что находит применение в геофизике, медицине и материаловедении. В области транспорта разрабатываются сверхпроводящие магнитные подвески для поездов, что позволяет существенно снизить трение и увеличить скорость движения.

5. Современные тенденции

Современные исследования в области сверхпроводимости направлены на поиск новых материалов, способных проявлять сверхпроводящие свойства при комнатной температуре и атмосферном давлении. Большое внимание уделяется гидридам, которые под воздействием высокого давления демонстрируют рекордные значения T_c . Наряду с этим разрабатываются новые композитные материалы и наноструктуры, которые позволяют улучшить характеристики существующих сверхпроводников.

Важным направлением является интеграция сверхпроводников в электронику, включая создание сверхпроводящих кубитов для квантовых компьютеров, что обещает революцию в вычислительных технологиях. Автоматизация производственных процессов, цифровое управление и применение искусственного интеллекта для проектирования новых материалов ускоряют прогресс в этой области. Активно ведутся работы по разработке новых охлаждающих систем и улучшению механических характеристик сверхпроводящих проводов.

Заключение

Сверхпроводимость — одно из наиболее впечатляющих достижений физики, которое сочетает фундаментальную научную значимость и широкие перспективы практического применения. С момента открытия прошло более века, но интерес к сверхпроводимости не ослабевает, напротив, он только возрастает. Исследования в этой области позволяют создавать более эффективные и экологически чистые технологии, снижать энергопотери и развивать совершенно новые направления науки и техники, включая квантовые вычисления. Разработка сверхпроводящих материалов, работающих при высоких температурах, является одной из главных задач современной физики, решение которой способно преобразовать многие отрасли промышленности и нашей повседневной жизни.

Литература

1. Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R. Theory of superconductivity. *Physical Review*, 1957.
2. Kamerlingh Onnes H. The resistance of pure mercury at helium temperatures. *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 1911.
3. Bednorz J.G., Müller K.A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B*, 1986.
4. Gurevich A. Limits of the upper critical field in dirty two-gap superconductors. *Physica C*, 2003.
5. Drozdov A.P. et al. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. *Nature*, 2015.
6. Anderson P.W. The resonating valence bond state in La_2CuO_4 and superconductivity. *Science*, 1987.