

## Список использованных источников

1. Химические источники тока: Справочник / под редакцией Н. В. Коровина и А. М. Скундина. - М.: Издательство МЭИ, 2003. – 740 с.
2. Алкалиновые батарейки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn -- 80aabsug3boo.xn -- plai/elementpitanija/83-alkalinovye-batareyki.html>. – Дата доступа: 23.09.2019.

УДК 621.315.05

**А.В. Повный**

Гомельский государственный политехнический колледж  
Гомель, Республика Беларусь

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*Аннотация.* Рассмотрены основные этапы открытия явления сверхпроводимости, высокотемпературных сверхпроводников. Описаны перспективы практического применения высокотемпературной сверхпроводимости в науке и технике.

**A.V. Povny**

Gomel State Polytechnic College  
Gomel, Republic of Belarus

## PRACTICAL APPLICATION OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

*Abstract.* The main stages of the discovery of the phenomenon of superconductivity and high-temperature superconductors are considered. The prospects for the practical application of high-temperature superconductivity in science and technology are described.

Сверхпроводимостью называется квантовое явление, заключающееся в том, что некоторые материалы при доведении их температуры до определенной критической, - начинают проявлять нулевое электрическое сопротивление. На сегодняшний день ученым известно уже несколько сотен элементов, сплавов и керамик, способных вести себя подобным образом.

Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 году голландским физиком и химиком Хейке Камерлинг-Оннесом. В 1933

году Вальтером Мейснером и Робертом Оксенфельдом был открыт эффект, заключающийся в полном исчезновении потока магнитного поля внутри сверхпроводящего материала ниже его критической температуры. Мейснер и Оксенфельд обнаружили, что магнитное поле полностью нейтрализуется внутри сверхпроводящего материала и что силовые линии магнитного поля вытесняются изнутри материала, поэтому он ведет себя как идеальный диамагнитный материал.

Эффект Мейснера — одно из свойств, определяющих сверхпроводимость. Этот эффект используется для демонстрации явления магнитной левитации сверхпроводников над магнитами, а также определяет понятие сверхпроводимости: сверхпроводник - это материал, в котором ниже определенной температуры электрическое сопротивление исчезает и возникает эффект Мейснера.

Изначально сверхпроводники имели очень ограниченное применение, поскольку их рабочая температура не должна была превышать 20К (-253°С). Усиленный интерес к вопросу практического применения сверхпроводимости начался в 1950-е годы, когда сверхпроводники второго рода с их высокими показателями плотности тока и магнитной индукции ярко вышли из-за горизонта. Далее они стали приобретать все большее практическое значение.

Изучение и применение сверхпроводимости связано с необходимостью получения низких температур. Достигается это путем охлаждения вещества криогенными жидкостями. Наиболее низкие температуры получают с помощью жидкого гелия. При атмосферном давлении он кипит при 4,2 К. Однако гелия мало, он дорог, а его использование требует сложного и тоже дорогостоящего оборудования.

Наиболее удобная для практики криогенная жидкость — жидкий азот. При атмосферном давлении температура кипения его составляет 77 К. Ожижение азота производится непосредственно из воздуха, а испаряющийся в процессе кипения газ вновь уходит в атмосферу. С этими обстоятельствами и связаны многолетние надежды физиков и инженеров — получить сверхпроводники с критической температурой, большей 77 К. Именно такие материалы можно назвать высокотемпературными сверхпроводниками.

В апреле 1986 г. в журнал физического общества «Zeitschrift fur Physik» поступила статья швейцарских ученых Герога Беднорца и Карлоса Мюллера, в которой сообщалось об открытии нового класса сверхпроводников — керамик из лантана, бария, меди и кислорода. Эта работа сравнительно быстро привлекла внимание физиков и химиков из многих лабораторий мира.

Создание новых сверхпроводящих керамик и изучение их свойств подобно «золотой лихорадке» охватило ведущие исследовательские центры уже в конце 1986 г. Сенсационные результаты, возбуждавшие фантазию не только специалистов, но и широкой общественности, следовали друг за другом и, наконец, в феврале 1987 г. в США были синтезированы первые высокотемпературные сверхпроводники.

До этого открытия максимальное значение критической температуры составляло 23,2 К. Этот рекорд принадлежал соединению  $\text{NbGe}$  (сплав ниобий-титан) и был достигнут в 1973 г. Высокотемпературные сверхпроводники, открытые Мюллером и Беднорцем, показали критическую температуру значительно выше, и температуры жидкого азота в 75К (-198°C) таким проводникам вполне достаточно для работы.

Важность мировой научной сенсации — обнаружения высокотемпературной сверхпроводимости — подтверждает то, что авторам открытия Дж. Беднорцу и К. Мюллеру присуждена Нобелевская премия по физике за 1987 г. Впервые за всю историю Нобелевских премий мировое научное сообщество признало и оценило открытие с такой быстротой.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости позволило продемонстрировать эффект Мейснера при комнатной температуре.

Открытие в 1987 году «скачка проводимости почти до нуля» при температуре 36К (-237°C) у соединений лантана, стронция, меди и кислорода ( $\text{La—Sr—Cu—O}$ ) стало началом. Затем впервые было открыто свойство соединения иттрия, бария, меди и кислорода ( $\text{Y—Ba—Cu—O}$ ) проявлять сверхпроводящие свойства при температуре 77,4К (-195,6°C), превышающей температуру кипения жидкого азота.

Столь резкий и быстрый рост критической температуры свидетельствовал о том, что достигнутые результаты не предел. Исследования интенсивно продолжались во всех ведущих центрах. В 2003 году открыли керамическое соединение  $\text{Hg—Ba—Ca—Cu—O(F)}$ , имеющее критическую температуру 138К (-135°C), и доходящую до 166К (-107°C) при давлении 400 кбар, а в 2015 году был установлен новый рекорд для сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ), который стал сверхпроводником при давлении в 100 ГПа, при температуре не превышающей 203К (-70°C).

На данный момент, конечно, можно говорить о значительных успехах в плане продвижения к получению высокотемпературных сверхпроводников. Так, например, металлокерамический состав  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  переходит в сверхпроводящее состояние при температуре

выше температуры сжижения азота. Однако большинство подобных решений связано с тем, что получаемые образцы хрупки и нестабильны, поэтому в технике по-прежнему остаются актуальными сплавы ниобия.

Главными крупными направлениями промышленного применения сверхпроводников остаются два: магнитные системы и электрические машины.

Закон электромагнитной индукции говорит о том, что вокруг электрического тока всегда существует магнитное поле. А поскольку сверхпроводники проводят ток без сопротивления, то достаточно просто поддерживать подобные материалы при правильных температурах, и таким путем получать детали для создания идеальных электромагнитов.

Поезда на магнитной подушке, активно эксплуатируемые сегодня в Японии, уже способны двигаться со скоростью 600 км/ч и давно доказали свою реализуемость и эффективность.

В медицинской диагностике технология магнитно-резонансной томографии предполагает использование в томографах мощных сверхпроводящих электромагнитов. Без них врачам бы не удалось получать столь впечатляющие изображения внутренних тканей человеческого организма с высоким разрешением, не прибегая к использованию скальпеля. Другими словами — это завтрашний день медицины.

Созданы рефрижераторы с высокой хладопроизводительностью (на уровне температур жидкого гелия), именно они способствовали развитию сверхпроводниковой техники еще в СССР. Уже тогда, в 80-е, были построены крупные электромагнитные системы. Была запущена первая в мире экспериментальная установка Т-7, предназначенная для изучения возможности инициирования реакции термоядерного синтеза, где для создания тороидального магнитного поля требовались сверхпроводящие катушки. В больших ускорителях элементарных частиц сверхпроводящие катушки также применяются - в пузырьковых камерах для жидкого водорода.

Разрабатываются и создаются турбогенераторы (в 80-е годы на основе сверхпроводников созданы сверхмощные турбогенераторы КГТ-20 и КГТ-1000).

Практически, высокотемпературные сверхпроводники обеспечивают передачу электроэнергии без потерь, что делает их внедрение и применение в будущем полезным и эффективным. Силовые кабели, трансформаторы, электрические машины, индуктивные накопители энергии с неограниченным сроком

ее хранения, ограничители тока и т.п., - всюду в электротехнике могут быть применимы высокотемпературные сверхпроводники. Габариты будут уменьшены, потери будут снижены, эффективность производства, передачи и распределения электрической энергии в целом повысится.

Трансформаторы будут иметь меньшую массу и очень низкие потери, по сравнению с трансформаторами, обладающими обычными обмотками. Сверхпроводящие трансформаторы будут экологически безопасными, их не нужно будет охлаждать, а в случае перегрузки ток будет ограничен.

Сверхпроводящие ограничители тока менее инерционны. При включении накопителей энергии и сверхпроводящих генераторов в электрические сети, повысится их стабильность.

Электроснабжение мегаполисов будет осуществляться посредством сверхпроводящих подземных кабелей, которые смогут проводить в до 5 раз больший ток, а прокладка таких кабелей позволит значительно экономить городские площади, поскольку кабели будут более компактными по сравнению с применяемыми сегодня.

Расчеты показывают, что, например, построение ЛЭП на 1ГВт при напряжении 154 кВ, если использовать сверхпроводящие кабели, обойдется на 38% дешевле, чем если бы это было реализовано по стандартной технологии. И это с учетом конструирования и монтажа, ведь число требуемых нитей меньше, соответственно общее количество кабеля меньше, и внутренний диаметр кабелепроводов также меньше.

Примечателен тот факт, что по сверхпроводящему кабелю можно передать значительную мощность и при низком напряжении, снизив электромагнитное загрязнение окружающей среды, а это актуально для густонаселенных районов, где прокладка высоковольтных линий порождает беспокойство, как среди экологов, так и у общественности.

На данный момент остаются актуальными лишь проблемы стоимости и обслуживания, связанные с необходимостью непрерывно прокачивать через систему азот. Тем не менее в 2008 году в Нью-Йорке компания American Superconductor успешно запустила первую коммерческую сверхпроводящую ЛЭП.

Перспективно внедрение высокотемпературных сверхпроводников и в сферу нетрадиционной энергетики, где экономичность выступает отнюдь не второстепенным фактором, и применение здесь сверхпроводников повысит эффективность новых

источников энергии. Тем более, уже на ближайшие 20 лет, имеет место устойчивая тенденция к их быстрому развитию в мире.

Уже существуют проекты сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии для создания аккумулирующих мощностей в масштабах энергосистем.

Раз сверхпроводник не пропускает магнитного потока, значит изделие такого рода экранирует магнитное излучение. Данное свойство сверхпроводников применяется в точных микроволновых устройствах, а также при защите от столь опасного поражающего фактора ядерного взрыва, как мощное электромагнитное излучение.

Можно предвидеть крупные изменения и в электронике с выделением в ней новой отрасли науки и техники — сверхпроводящей электроники. Комбинируя сверхпроводники с полупроводниками, ученые создают сверхбыстрые квантовые компьютеры, являющие миру новое поколение вычислительной техники.

Исследованием уже известных и поиском новых высокотемпературных сверхпроводников сейчас занимаются во всех ведущих научных центрах и лабораториях. Не исключено, что мы скоро станем свидетелями открытия высокотемпературных сверхпроводников следующего поколения, не требующих охлаждения для перехода в сверхпроводящее состояние, которые окажутся сверхпроводниками при температуре 273,15 Кельвина, или ноль по шкале Цельсия.

### **Список использованных источников**

1. Повный А. В. Высокотемпературная сверхпроводимость: история открытия, физика явления и перспективы использования, <http://elektrik.info/main/fakty/1017-vysokotemperaturnaya-sverhprovodimost.html>
2. Повный А. В. Сверхпроводимость металлов, открытие Хейке Камерлинг-Оннеса, <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2218-sverhprovodimost-metallor-otkrytie-heyke-kamerling-onnesa.html>
3. Повный А. В. Демонстрация эффекта Мейснера: сверхпроводники и левитация, <http://elektrik.info/main/fakty/1737-demonstraciya-effekta-meysnera.html>
4. Повный А. В. Применение сверхпроводимости в науке и технике, <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2320-primenenie-sverhprovodimosti-v-nauke-i-tehnikе.html>