



ИнфоМайн 

исследовательская группа

Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов,
металлургии и химической промышленности

Обзор рынка низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) в России и мире

*Издание 2-ое
дополненное и переработанное*

Демонстрационная версия

*Москва
Декабрь, 2010*

Internet: www.infomine.ru

e-mail: info@infomine.ru

Содержание

1. Развитие научных исследований и мирового рынка сверхпроводящих материалов.....	7
2. Производство и импорт Россией низкотемпературных сверхпроводящих материалов и оборудования на их основе	20
3. Мировые производители низкотемпературных сверхпроводящих материалов и оборудования на их основе	38
3.1. Wah Chang Alabama	38
3.2. Luvata	40
3.3. Alstom Magnets and Superconductors	42
3.4. Oxford Instruments	43
3.5. Bruker Corporation	55
3.6. Kobe Steel, Ltd (JASTEC - Japan Superconductor Technology, Inc).....	59
3.7. Hitachi.....	63
3.8. Toshiba.....	66
3.9. General Electric Corporation.....	67
3.10. Siemens	69
3.11. Royal Philips Electronics of the Netherlands	71
3.12. Mitsubishi Electric	72
4. Ситуация на рынке низкотемпературных сверхпроводящих материалов: производимая продукция, объемы потребления, цены.....	73
5. Перспективы мирового и российского рынков низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводящих материалов.....	101
Выводы.....	114
Контактная информация.....	116
Источники информации	119

Таблицы

Таблица 1. Направления использования сверхпроводников и требуемые значения плотности тока и магнитного поля	10
Таблица 2. Сравнительные характеристики жидких хладагентов	13
Таблица 3. Сверхпроводящие магниты для ускорителей	17
Таблица 4. Преимущества и недостатки магнитов МРТ	19
Таблица 5. Экспорт сверхпроводящих магнитов Институтом ядерной физики им. Будкера СО РАН в 1999-2010 гг.	29
Таблица 6. Экспорт сверхпроводящих магнитов ЗАО НПП «Гиком» в 1999-2010 гг.	30
Таблица 7. Импорт сверхпроводящих кабелей и проводов Россией в 1997-2010 гг.	31
Таблица 8. Импорт сверхпроводящих магнитов Россией в 1999-2010 гг.	32
Таблица 9. Импорт магнитно-резонансных томографов Россией в 1997-2006 гг.	33
Таблица 10. Структура импортных поставок магнитно-резонансных томографов	35
Таблица 11. Структура импортных поставок магнитно-резонансных томографов	35
Таблица 12. Поставки магнитно-резонансных томографов в Россию в I-м полугодии 2010 г.	36
Таблица 13. Импортные поставки МРТ со сверхпроводящими магнитами в Россию (согласно формальному описанию).....	37
Таблица 14. Производство продукции Wah Chang на основе экзотических металлов (циркония, гафния и ниобия) в 2005-2009 гг.	40
Таблица 15. Импорт Финляндией ниобиевых сплавов в 2002-2009 гг.	42
Таблица 16. Критический ток проволоки NbTi/Cu производства OST	44
Таблица 17. Технические характеристики композитов NbTi	44
Таблица 18. Технические характеристики NbTi проволоки в медном канале при диаметре нити 50,105 мкм и полиэстеровой изоляции (производство OST).....	45
Таблица 19. Характеристики NbTi проводника с нитями.....	46
Таблица 20. Критический ток проволоки Nb ₃ Sn (производство OST)	47
Таблица 21. Технические характеристики провода Nb ₃ Sn (производство OST).....	47
Таблица 22. Характеристики стандартных соленоидных магнитов с гелиевым охлаждением (производство OST)	48
Таблица 23. Финансово-экономические показатели деятельности Oxford Instruments в 2002-2009 гг.	49
Таблица 24. Горизонтальные сверхпроводящие магниты Bruker	57
Таблица 25. Этапы деятельности Kobe Steel в области сверхпроводимости	60
Таблица 26. Номенклатура сверхпроводящей проволоки Nb ₃ Sn производства JASTEC	61
Таблица 27. Номенклатура сверхпроводящей проволоки NbTi производства JASTEC	62

Таблица 28. Разработки компании Hitachi Cable Ltd в области сверхпроводников	64
Таблица 29. Экспорт странами ЕС (ЕС-27) изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	74
Таблица 30. Экспорт Бельгией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	75
Таблица 31. Экспорт Великобританией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	76
Таблица 32. Импорт ЕС-27 изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	77
Таблица 33. Импорт странами ЕС изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	78
Таблица 34. Импорт Германией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	79
Таблица 35. Импорт Францией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	80
Таблица 36. Импорт Нидерландами изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	80
Таблица 37. Импорт Финляндией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	81
Таблица 38. Импорт Великобританией изделий по коду ТНВЭД 81.12.99.30 в 2002-2009 гг.	81
Таблица 39. Импорт Японией сплава NbTi (код 81.12.99-100) в 2007-2010 гг.	82
Таблица 40. Структура мирового экспорта магнитно-резонансных томографов в 2002-2009 гг.	84
Таблица 41. Экспорт магнитно-резонансных томографов странами ЕС (ЕС-27) в 2002-2009 гг.	85
Таблица 42. Региональная структура экспорта МРТ США в 2002-2009 гг.	86
Таблица 43. Региональная структура экспорта МРТ Нидерландами в 2002-2009 гг.	88
Таблица 44. Региональная структура экспорта МРТ Великобританией в 2002-2009 гг.	91
Таблица 45. Региональная структура экспорта МРТ Германией в 2002-2009 гг.	92
Таблица 46. Региональная структура экспорта МРТ Японией в 2002-2009 гг.	95
Таблица 47. Региональная структура экспорта МРТ Китаем в 2002-2009 гг.	97
Таблица 48. Импорт магнитно-резонансных томографов в 2002-2009 гг. отдельными странами	98
Таблица 49. Количество магнитно-резонансных томографов по странам мира	100
Таблица 50. Классификация магнитно-резонансных томографов и их стоимость	101
Таблица 51. Оценка перспектив ВТСП-технологии в ЕС к 2015 г.	108
Таблица 52. Мировой рынок сверхпроводников*	110
Таблица 53. Ретроспектива и перспективы использования сверхпроводящих материалов в магнитных системах ускорителей	112

Рисунки

Рисунок 1. Развитие разработки сверхпроводящих материалов.....	12
Рисунок 2. Стенды ИСФТТ для контроля характеристик сверхпроводящей провода.....	22
Рисунок 4. Проволока «NbTi/Cu матрица» производства OST.....	44
Рисунок 5. Проволока NbTi в медном канале (производство OST).....	45
Рисунок 6. Проволока Nb ₃ Sn (производство OST).....	46
Рисунок 7. Проволока Nb ₃ Sn для проекта ITER (производство OST).....	48
Рисунок 8. Сверхпроводящая проволока Nb ₃ Sn производства JASTEC: стабилизированная внутри; стабилизированная снаружи; упрочненная танталом.....	62
Рисунок 9. Сверхпроводящая проволока NbTi круглого и прямоугольного сечения производства JASTEC.....	63
Рисунок 10. Динамика экспорта МРТ ведущими странами-производителями в 2002-2009 гг.	83
Рисунок 11. Прогноз Всемирного банка по продажам СП оборудования.....	109

Аннотация

Настоящий отчет посвящен исследованию рынка низкотемпературных сверхпроводников в России и мире. Отчет состоит из 4 частей, содержит 119 страниц, в том числе 53 таблицы, 11 рисунков и приложения (контактная информация, источники информации).

Данная работа являлась кабинетным исследованием. В качестве источников информации использовались данные Федеральной таможенной службы РФ, статистических органов ООН, Евросоюза, США, Японии, научные периодические издания по проблемам сверхпроводимости, материалы конференций, семинаров и симпозиумов, а также Интернет-сайты участников рынка сверхпроводниковых материалов.

В первой части описано развитие научных исследований и мирового рынка сверхпроводящих материалов.

Вторая часть посвящена производству и импорту Россией низкотемпературных сверхпроводящих материалов (НТСП) и оборудования на их основе. В данном разделе приведены данные о разработчиках и производителях НТСП в России, представлена динамика импорта Россией магнитно-резонансных томографов (МРТ) - основной коммерческой продукции с использованием сверхпроводящих магнитов – за период 1999-2010 гг.

Третья часть посвящена мировым производителям НТСП и оборудования на их основе. Описаны основные производители низкотемпературных сверхпроводников на основе ниобиевых сплавов и магнитно-резонансных томографов, приведена мировая статистика внешнеторговых операций с МРТ за период 2002-2009 гг.

В четвертой части рассмотрены перспективы мирового и российского рынка сверхпроводящих материалов (НТСП и ВТСП) и развития направлений их использования.

В приложениях приведены контактная информация основных участников рынка и источники информации.

1. Развитие научных исследований и мирового рынка сверхпроводящих материалов

Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 г. Через 50 лет на базе сверхпроводящих материалов и криогенной техники гелиевого уровня температур зародились низкотемпературные сверхпроводниковые технологии (НТСП-технологии).

Их использование позволило создать уникальные исследовательские установки, такие как ускорители заряженных частиц на сверхвысокие энергии, детекторы для ядерной физики и физики элементарных частиц, установки для термоядерных исследований с магнитным удержанием горячей плазмы, лабораторные сверхпроводящие (СП) магнитные системы, ответственные устройства специальной техники, измерительные приборы рекордной чувствительности и точности, а также оборудование, ставшее предметом прямого коммерческого интереса. Последнее относится к тем сферам деятельности, в которых применение сверхпроводников дает либо принципиально новое качество производимой продукции, как в случае, например, магниторезонансных томографов или высокоградиентных магнитных сепараторов, либо совершенно новое оборудование, как, например, СП индуктивные накопители электроэнергии с неограниченным сроком ее хранения.

НТСП-технологии опираются на следующие уникальные свойства сверхпроводников:

1) сверхпроводники в интервале значений, ниже критических величин температуры, индукции магнитного поля и плотности электрического тока, имеют нулевое сопротивление (т.е. способны нести бездиссипативный постоянный ток – ток без потерь на нагрев проводника). Уровень потерь определяется фактором $\rho \cdot j^2$, где ρ – удельное сопротивление, j – плотность тока. В технических изделиях из сверхпроводников (проводах, кабелях и т.д.) эффективное сопротивление на переменном токе промышленной частоты (50-60 Гц) из-за потерь на гистерезис и вихревые токи, хотя и отличается от нуля, но составляет одну десятитысячную или менее от эффективного сопротивления обычного проводника при комнатной температуре;

2) при значениях магнитного поля ниже так называемого мейснеровского сверхпроводники обладают идеальным диамагнетизмом – магнитное поле не проникает в тело сверхпроводника;

3) магнитный момент сверхпроводящего кольца или полого цилиндра может изменяться только дискретно на величину кванта магнитного потока, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Гс·см²;

4) поверхностное сопротивление сверхпроводника при частотах, ниже критических, в 10-100 раз меньше поверхностного сопротивления хорошо проводящих материалов (медь, алюминий) при тех же температурах;

5) в сверхпроводниках возможно протекание тока без падения напряжения через туннельный контакт, образованный двумя сверхпроводниками, которые разделены тонким слоем (масштаб – нанометры) диэлектрика (стационарный эффект Джозефсона), либо протекание тока, сопровождаемое при превышении некоторой критической его величины генерацией электромагнитного излучения с частотой, которая определяется разностью потенциалов на контакте (нестационарный эффект Джозефсона).

Первые два из упомянутых свойств лежат в основе сильноточных СП технологий, предназначенных для устройств больших мощностей и запасенных энергий. Эти технологии находят непосредственное применение в электроэнергетике, а с некоторыми вариациями – во всех направлениях промышленного производства и транспорта. Остальные свойства используются в слаботочных СП технологиях, применяемых в телекоммуникационной технике, прецизионном приборостроении, научном и медицинском оборудовании.

К середине 70-х годов прошлого века в рамках министерства среднего машиностроения СССР было создано промышленное производство технических СП материалов, а на предприятиях министерства химического машиностроения – криогенного оборудования гелиевого уровня температур. В отраслевых и академических институтах активно разрабатывались устройства, использующие явление СП, - от лабораторных магнитов для камерных научных исследований в физике, химии, биологии до крупных, индустриально масштаба, установок по магнитному удержанию горячей термоядерной плазмы или импульсные источники энергии большой мощности на базе индуктивных накопителей. Лидерами этих работ в мире были СССР и США.

Основу технических СП материалов составляли два вещества.

Одно из них – деформируемый сплав Nb-Ti со следующими параметрами: критическая температура 9,6 К при нулевых магнитном поле и токе, критическое магнитное поле 12 Тл при 4,2 К, нулевом токе и критической плотности тока $3 \cdot 10^9$ А·м⁻² при 4,2 К и в магнитном поле 5 Тл. Стоимость такого материала не превышала нескольких долларов за 1 кА·м.

Вторым сверхпроводником, освоенным промышленностью позже, стало интерметаллическое соединение Nb₃Sn, которое несколько расширило диапазон рабочих температур и магнитных полей для СП устройств. Материал на основе Nb₃Sn имел критическую температуру 18,3 К при нулевых магнитном поле и токе, критическое магнитное поле около 22 Тл при 4,2 К и нулевом токе, критическую плотность тока более высокую, чем в материалах на основе сплава Nb-Ti, в частности, при 4,2 К в поле 10 Тл плотность тока в нем превышала 10^9 А·м⁻². Его стоимость была примерно 10 долларов за 1 кА·м.

Сами технические СП провода представляли собой сложные композитные конструкции из разнородных материалов с ультратонкими (до долей микрона) нитями собственно сверхпроводника. Научоемкая технология их изготовления была освоена наряду с СССР и США Японией, Германией и рядом других индустриально развитых стран.

Значения рабочих магнитных полей и плотностей тока, которые удавалось достичь в СП устройствах, использующих Nb-Ti и Nb₃Sn при температурах вблизи 4,2 К, практически перекрывали прогнозируемые потребности всего электротехнического и электроэнергетического оборудования (табл. 1).

Таблица 1. Направления использования сверхпроводников и требуемые значения плотности тока и магнитного поля

Применение	Плотность тока, А·м ⁻²	Магнитная индукция, Тл
Кабель переменного тока	10 ⁹ -10 ¹⁰	< 1
СП индуктивный накопитель электроэнергии	10 ⁹	5-8
Магниты	10 ⁸ -10 ⁹	10-20
Магнитогидродинамический генератор и термоядерный реактор с магнитным удержанием плазмы	10 ⁹	6-16
Сепараторы	10 ⁸	2-5
Генераторы	10 ⁸	2-5
Электродвигатели	10 ⁸	2-5
Ограничители тока	10 ⁹	1-3
Трансформаторы	10 ¹⁰	< 2
Переключатели	10 ¹⁰	< 1
Поезда на магнитном подвесе	10 ⁸ -10 ⁹	5
Магниторезонансные томографы	10 ⁹	0,5-4

К тому же значительно уменьшались его омические потери и массогабаритные показатели. Ожидалось, что применение СП технологий гелиевого уровня температур позволит не только расширить спектр исследовательских установок и устройств специальной техники, но, прежде всего, окажет преобразующее воздействие на электроэнергетику, транспорт и другие электропотребляющие отрасли народного хозяйства.

С середины 60-х годов, начала исследования по прикладной сверхпроводимости, в развитых странах разрабатываются СП варианты практически всех основных электротехнических устройств, которые генерируют, передают, преобразуют и потребляют электроэнергию в промышленном масштабе. Достаточно показательной иллюстрацией этого утверждения может служить отечественная программа по сильноточной СП технологии гелиевого уровня температур для электротехники и электроэнергетики, просуществовавшая до 90-х годов. Были созданы и испытаны представительные модели и опытно-промышленные образцы СП турбогенераторов мощностью от 1 до 20 МВ·А, изготовлены турбогенератор мощностью 300 МВ·А, коллекторные и униполярные двигатели мощностью до 10 МВт, системы движения для морского и железнодорожного транспорта, трансформаторы, токоограничители, гибкие и жесткие линии электропередач, индуктивные накопители энергии. Создание нетрадиционных видов электротехнического оборудования потребовало выполнения большого

комплекса сопутствующих научных исследований и разработки принципиально новых методов электромагнитных, механических, физических и гидродинамических расчетов с их экспериментальной верификацией на макетах и моделях.

Это оборудование продемонстрировало выигрыш в КПД и массогабаритных показателях по сравнению с традиционными. И хотя были очевидны пути повышения его надежности до уровня требований энергетических стандартов, по ряду причин оно не получило промышленного распространения.

Из-за слишком большого значения фактора $r \cdot j^2$ (фактора омических потерь), конкурентоспособным СП оборудование признавалось при больших единичных мощностях, например, генераторы при мощностях более 800-1000 МВ·А, линии электропередач при мощностях более 5 ГВ·А и дальностях в несколько тысяч километров. Большое сопротивление по отношению к новому встречала перспектива использования сложного и на первых порах недостаточно надежного криогенного оборудования гелиевого уровня температур и самого хладагента – дорогого жидкого гелия.

Выйти на коммерческой основе за пределы экономических и психологических барьеров смогли три типа СП устройств гелиевого уровня температур: магниторезонансные томографы с СП магнитами, СП сепараторы и малые индуктивные накопители энергии.

Производство томографов на СП магнитах началось в 80-е годы. Благодаря хорошему качеству диагностической информации, связанному с высокой индукцией магнитного поля, стабильностью во времени и пространственной однородностью так называемого замороженного магнитного поля СП соленоида к 90-м годам они сильно потеснили на рынке более дешевые томографы с резистивными или постоянными магнитами.

СП сепараторы и индуктивные накопители делают первые шаги на рынке. В СССР был создан объемно-градиентный магнитный сепаратор для обогащения бедных железистых кварцитов, в США – высокоградиентные сепараторы для прецизионной очистки каолина и СП индуктивные накопители с запасенной энергией масштаба нескольких кВт·часов, установленные в системах бесперебойного обеспечения электропитания ответственных потребителей энергии. Все это стало возможным после заметного совершенствования криогенной техники гелиевого уровня температур.

Итогом развития СП технологии гелиевого уровня температур стали выдающиеся результаты, полученные при создании уникальных электрофизических установок, и первые коммерческие успехи, однако эта технология не смогла существенно повлиять на облик промышленной электроэнергетики.

Положение радикально изменилось в 1986 г. с открытием так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с критическими температурами перехода в СП состояние, быстро достигшими величин, превышающих 77,3 К – температуру кипения жидкого азота при нормальном

давлении (рис. 1). Появилась возможность вместо невозобновляемого и дорогого хладагента – жидкого гелия – использовать жидкий азот.

Однако она может быть реализована, если удастся разработать технологию технических ВТСП-материалов с необходимыми эксплуатационными качествами и приемлемой стоимостью. Между тем создание технологии токонесущих элементов из ВТСП-материалов оказывается неизмеримо более сложной задачей, чем технологии СП обмоточных материалов гелиевого уровня температур. Технология керамических сверхпроводников все еще находится на стадии становления из-за частичной нестабильности оксидных ВТСП-материалов, их высокой хрупкости и анизотропии.

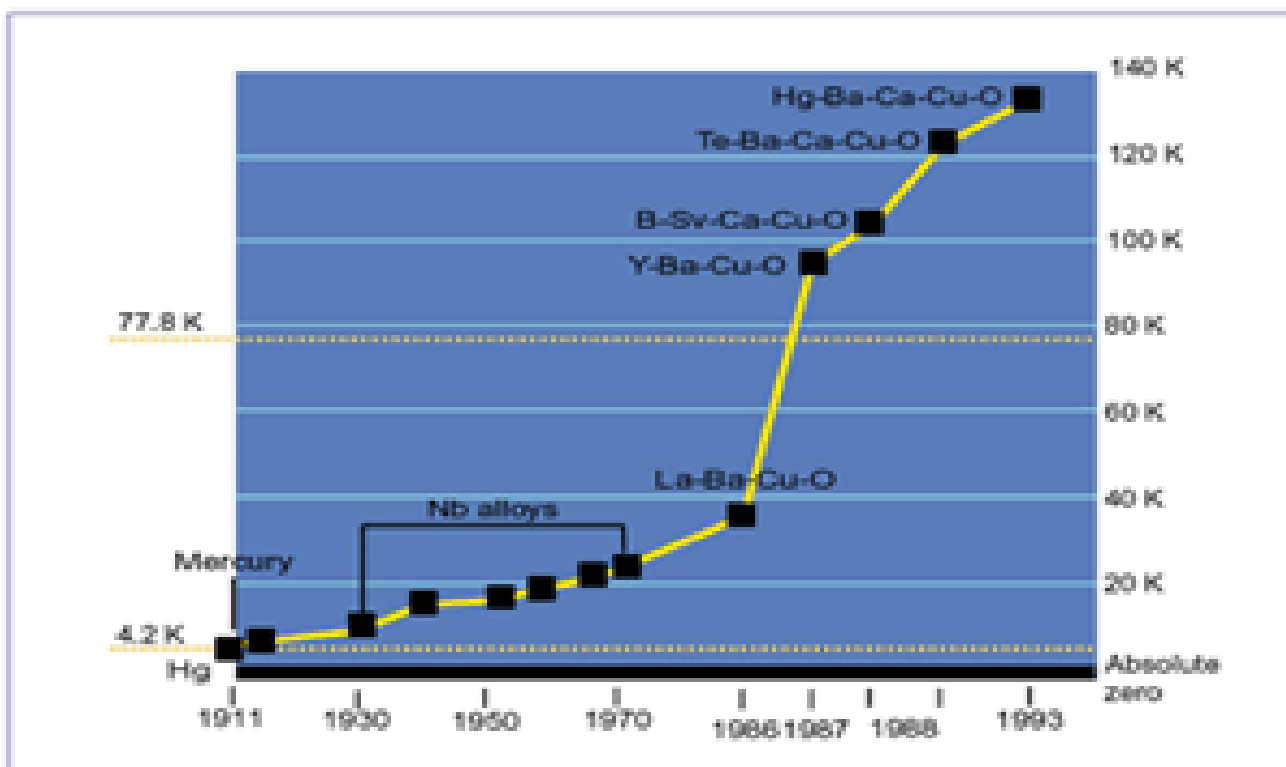


Рисунок 1. Развитие разработки сверхпроводящих материалов

Тем не менее, к середине 90-х годов были разработаны конструкции первого поколения ВТСП-проводов и начат их опытно-промышленный выпуск в США, Японии, ЕС и России. Провода производятся главным образом методом «порошок в трубе». В процессе термомеханохимической обработки заготовки из серебряной трубки или трубки из легированного серебра, заполненной порошкообразным ВТСП, формируется лента с характерным сечением 4x0,3 мм² и длиной до 1000 м. Ленточные провода изготавливаются на основе соединения $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ в серебряной оболочке (Bi2212/Ag). Несмотря на относительно низкую критическую температуру этого соединения (около 90 К), его технологические свойства и достижимость высоких плотностей критического тока в сильных магнитных полях при температурах

20-30 К превышают возможности всех освоенных НТСП-материалов при 4,2 К. Этот материал имеет реальную перспективу для применения в СП устройствах с сильными магнитными полями при рабочих температурах вблизи температуры жидких водорода или неона. Производятся также ленточные провода на основе соединения $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в серебряной оболочке (Bi2212/Ag). В настоящее время этот материал активно используется в разработках электротехнического оборудования. Он имеет критическую температуру 107 К, критическую плотность тока порядка $10^8 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$ при температуре 77,3 К и полях 1 Тл и менее, а с понижением рабочей температуры его характеристики существенно улучшаются. Стоимость этого материала около 100 долларов за 1 кА·м. Рост масштабов его производства, совершенствование технологии и раскрытие потенциальных возможностей дают основание ожидать снижения цены на порядок. Тогда ВТСП устройства станут конкурентоспособными.

Начат выпуск массивных материалов на основе соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (или $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), которые в режиме замороженного поля конкурируют с такими постоянными магнитами, как Nd-Fe-B. Эти соединения очень перспективны для создания длиномерных токонесущих элементов с высокой плотностью тока ($\sim 10^9 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$) при 77,3 К в полях до 5 Тл.

В промышленности переход от НТСП к ВТСП несет в себе возможность повышения рабочих температур СП устройств вплоть до азотных, замены жидкого гелия на жидкий азот, очевидное упрощение системы криостатирования и сокращение в сотни раз связанных с этим эксплуатационных расходов (табл. 2). Кроме того, ВТСП-устройство более устойчиво к внешним возмущениям, а криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации. Важным положительным фактором, позволяющим существенно упростить конструкцию высоковольтной изоляции, является высокая диэлектрическая прочность жидкого азота, сравнимая с диэлектрической прочностью трансформаторного масла.

Таблица 2. Сравнительные характеристики жидких хладагентов

Характеристики	Хладагент	
	Жидкий азот	Жидкий гелий
Скрытая теплота испарения, МДЖ/м ³	161	2,58
Теплосъем, кВт/м ²	115-180	9-10
ΔT при $T_{\text{кип}}$, К	6-18	0,5-1
Теплоемкость меди при $T_{\text{кип}}$, Дж/кг·К	230	0,09
Электрическая прочность, кВ/мм	2	1,9
Цена, \$/л	0,11-0,3	5-10
Затраты мощности при 300 К на 1 Вт при $T_{\text{кип}}$	8-12	450-800
Преимущества	проще изоляция и эксплуатация	проще осуществить вывод запасенной энергии

Необходимость криостатирования СП оборудования создает благоприятные возможности для повышения его надежности. При криогенных температурах не возникают температурные градиенты и соответствующие термомеханические напряжения (в медных обмотках градиенты температуры достигают 80-100 К), практически отсутствует старение высоковольтной изоляции. Поскольку СП электротехнические устройства часто функционируют в сочетании с полупроводниковыми преобразователями, то можно улучшить рабочие параметры последних при близких к азотным температурах, расположив оба устройства в едином криостатируемом объеме.

За прошедшие годы не стояла на месте и криогенная техника. Наиболее яркой демонстрацией этого прогресса служат системы криостатирования с широким спектром температур, начиная с гелиевых. Разработаны компактные, с большим ресурсом безостановочной работы микроохладители, надежность которых приближается к надежности домашнего холодильника. Именно успехи в криогенной технике сделали возможным широкое распространение в клиниках магниторезонансных томографов с СП магнитами гелиевого уровня температур, привели к созданию первых промышленных СП сепараторов и малых СП индуктивных накопителей энергии для систем бесперебойного энергообеспечения ответственных потребителей.

В области НТСП-технологии и ее использования СССР был мировым лидером наряду с США. После открытия ВТСП-материалов в стране была принята государственная научно-техническая программа «Высокотемпературная сверхпроводимость». Были выделены дополнительные средства для развития исследований и разработок по ВТСП, и впервые в практике финансирования науки в стране был применен принцип конкурсного отбора работ. Диапазон исследований был существенно расширен. Все это позволяло стране сохранять лидерство в этой научно-технической области до начала 90-х годов.

После развала СССР финансирование программы было сокращено более чем в 100 раз, что в первую очередь затруднило проведение прикладных исследований как наиболее ресурсоемких. В несколько раз сократилось количество организаций, участвующих в работах по прикладной сверхпроводимости, за рубеж уехала часть специалистов, устаревает экспериментально-стендовая база.

Тем не менее, в стране сохранились высокий уровень исследований и разработок по сверхпроводимости, ведущие научно-инженерные кадры и уникальные экспериментально-стендовые базы. Благодаря конструктивной политике Росатома было сохранено опытно-промышленное производство НТСП и ВТСП материалов, что позволяет России в современных условиях оставаться одним из участников международных проектов, таких как международный экспериментальный термоядерный реактор (ITER) и ускоритель «Большой адронный коллайдер» в CERN.

Успешно развиваются исследования и разработки в области СП электроники. Причиной этого являются уникальные возможности, которые открыла сверхпроводимость перед радиоэлектроникой (высокие, близкие к

предельным квантовой чувствительностью и точностью измерительных средств, высокая добротность резонансных систем, миниатюризация многих ответственных устройств радиотехники и электроники), а также низкая материалоемкость этих устройств и скромные требования к мощностям криостатирования. Были разработаны и испытаны сверхчувствительные измерители магнитного потока, тока и напряжения, создан квантовый эталон Вольта, уникальные магнитометры и градиентометры, приемники излучения, превосходящие самые совершенные полупроводниковые устройства. Часть из них, например сверхпроводниковые болометры и стробоскопические приставки к осциллографам, выпускались малыми партиями преимущественно небольшими фирмами. Применялся в основном Nb/AlO_x/Nb.

Практическому освоению СП электронных устройств препятствовала не только необходимость криостатирования. Отсутствовали соответствующая технология, особенно для цифровой СП электроники, и надежное, с контролируемыми параметрами производство разнообразных элементов, имеющих высокую плотность компоновки в многослойных системах. Тем не менее, открытие ВТСП-материалов и совершенствование техники криостатирования на гелиевом и на азотном уровнях температур стали мощным стимулом как самих разработок по СП электронике, так и их практического использования в телекоммуникационной, приборной, компьютерной и медицинской технике.

СП электроника подразделяется на три направления: пассивные СП элементы; СКВИД-электроника (сверхпроводящие квантовые интерферометрические устройства) и цифровая техника с большим количеством джозефсоновских переходов.

Смена НТСП на ВТСП важна не только с точки зрения рабочих температур пассивных СВЧ-устройств, но и расширения рабочего диапазона частот до сотен гигагерц. При этом использование СП приводит к малым потерям, практическому отсутствию дисперсии сигнала, возможности управлять параметрами устройств за счет изменения реактивных или резистивных свойств под внешним воздействием. Это распространяется на широкий спектр пассивных СВЧ-устройств: линии передач, линии задержек, полосовые фильтры, амплитудные и фазовые модуляторы, переключатели и ограничители СВЧ-мощности, малогабаритные антенны, как приемные, так и передающие, резонаторы и др. Разработаны, успешно испытаны и начали эксплуатироваться СП спутниковые системы связи, миниатюризированные и с повышенной пропускной способностью; системы связи с подвижными объектами (сотовой связи) третьего поколения, в которых применяются ВТСП-фильтры СВЧ-диапазона с уникальными характеристиками: шириной полосы пропускания 20 МГц, потерями на проход менее 0,5 дБ, затуханием вне полосы 85 дБ, крутизной склонов частотной характеристики 100 дБ/МГц и рабочей температурой 60 К. Кроме того, созданы системы перестраиваемых ВТСП-фильтров для локационной техники.

Криостатирование подобных устройств обеспечивается микроохладителями, масса которых – единицы или десятки килограмм, а срок

непрерывной работы до 40-50 тыс. часов. Основным рабочим ВТСП-материалом современной СП электроники является $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В СКВИД-электронике используется непревзойденная чувствительность СКВИДов (10^{-14} Тл/ГГц) к изменению магнитного потока. Благодаря этому СКВИДы находят применение в прецизионных приборах, измеряющих предельно малые токи, напряжение и изменение магнитного потока. По этим параметрам можно оценивать многообразные свойства и явления – от перемещения в пространстве до химического превращения. Технология ВТСП-СКВИДов быстро совершенствуется. Из-за проблемы температурных шумов НТСП-СКВИДы, работающие при 4,2 К, будут всегда иметь определенное преимущество перед СКВИДАми, функционирующими при азотных температурах, но область использования ВТСП-СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. Весьма интересны разработки нового поколения магнитометрических систем неразрушающего контроля, необходимых, в первую очередь, атомной, авиационной и космической промышленности. Перспективно развиваемое направление медицинской диагностики – магнитокардиография и магнитоэнцефалография.

В области цифровой, или дискретной, СП электроники происходит постоянный рост числа элементов на одном чипе. Все большее практическое применение находит квантовый стандарт Вольта, получаемый методом интеграции 10^4 джозефсоновских переходов на одном чипе. В космическом эксперименте на спутнике ARGOS, наряду с пассивными СП элементами, испытывались СП цифровые подсистемы, обеспечивающие более чем 100-кратное снижение потребления мощности при 10-кратном увеличении быстродействия и 10-кратном уменьшении массы по сравнению с полупроводниковыми системами на основе кремния или арсенида галлия.

В настоящее время стало общепринятым использование СП магнитов в **ускорителях**. Во многом это было связано с переходом к коллайдерным машинам на встречных пучках.

Имеется ряд принципиальных особенностей в требованиях к конструкции СП магнитов для ускорителей в отличие от других традиционных областей использования. В магнитах предусматривается защита СП от перехода в нормальное состояние и стабильность СП материала к скачкам магнитного потока, поэтому СП нити помещают в матрицу из меди, а для минимизации вихревых токов при изменении магнитного поля композитные проволоки твистятся.

Разработанный для ускорительных магнитов композит, как правило, представляет собой сложную конструкцию: проволока (диаметром менее 1 мм) содержит свыше 10^4 скрученных жил NbTi, окруженных барьером и размещенных в медной матрице. Единичная проволока способна нести ток 500 А в поле 5 Т (при 4,2 К), а так как магниты для ускорителей рассчитываются на ток обмотки 5-10 кА, то применяется кабель, полученный скруткой проволок с последующей формовкой и нанесением изоляции. Практически во всех дипольных СП магнитах используется кабель резерфордского типа: несколько проволок (от 19 до 36) скручиваются и затем формируются в виде

плоского двухслойного кабеля. Транспонирование проволок в кабеле применяется для того, чтобы уменьшить вихревые токи и обеспечить равномерное распределение токов.

Тонкие СП нити и низкая намагниченность обмотки необходимы при формировании магнитного поля, особенно при инжекции заряженных частиц, осуществляемой при низком уровне магнитного поля. Для этих целей предпочтительней иметь СП нити диаметром 5-10 мкм, которые можно экономно производить в фабричных условиях без разрушения и дефектов по длине. СП нити меньшего размера могут приводить к связи волокон через медную матрицу из-за близости расположения. В поле 6 Т Nb-Ti толщиной 6 мкм способны нести ток около 50 мА и композитная проволока, содержащая от 5 до 10 тысяч таких нитей, обладает токонесущей способностью в 500 А.

Параметры СП кабеля определяются характеристиками проволоки, и в процессе изготовления проводника руководствуются следующими требованиями. Критическое поле и температура зависят от химического состава материала, поэтому в процессе изготовления необходимо контролировать стехиометрический состав сплава. Критический ток определяется микроструктурой материала (размерами и распределением центров пиннинга) и зависит от промежуточных отжигов и механической нагрузки в процессе волочения проволоки.

Для криогенной стабилизации СП жилы размещаются в медной матрице, что снижает конструктивную плотность тока в магните. Для предотвращения скачков потока в сверхпроводнике, диаметр СП жил должен быть менее 50 мкм, а для уменьшения гистерезисных потерь и искажения магнитного поля за счет намагниченности диаметр СП жил должен находиться в интервале 5-10 мкм. С целью уменьшения вихревых потерь жилы должны скручиваться (типичный шаг скрутки составляет 25 мм).

Таблица 3. Сверхпроводящие магниты для ускорителей

<i>Установка</i>	<i>Центр</i>	<i>Год пуска</i>
PLUTO	DESY	1972
ISR	CERN	1976
CELLO	DESY	1978
CLEO	CORNELL	1981
TPS	SLAC	1983
Tevatron	FNAL	1983
CDF	FNAL	1984
TOPAZ	KEK	1984
VENUS	KEK	1985
CLEO II	CORNELL	1987
DELPHI	CERN	1987
ALEPH	CERN	1989
HERA	DESY	1992
CMD-2 (КМД-2)	ВЭПП-2М ИЯФ им. Будкера СО РАН	1992
H1	DESY	1994
ZEUS	DESY	1994
RHIC	BNL	2000

DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) – крупнейший германский исследовательский центр по физике частиц, расположенный в Гамбурге и Цойтене. В центре созданы и эксплуатируется несколько ускорителей частиц.

CORNELL – ускоритель в университете Cornell, США.

SLAC – Stanford Linear Accelerator Center – национальная ускорительная лаборатория, подчиняющаяся министерству энергетики США и управляемая Станфордским университетом.

FNAL – Fermi National Accelerator Laboratory, USA – национальная ускорительная лаборатория, штат Иллинойс, США

BNL – Brookhaven National Laboratory, USA – Брукхейвенская национальная лаборатория, США

KEK – национальная организация в области физики высоких энергий, Япония.

CERN – Европейский центр ядерных исследований

В настоящее время в CERN введены в эксплуатацию установки ALICE, ATLAS, CMS, LHC-B и FELIX, предназначенные для экспериментов на LHC.

Мюонный спектрометр ATLAS содержит три больших тороида, магнитное поле которых перпендикулярно траектории мюона. Каждый тороид содержит обмотки типа “racetrack”, изготовленные из СП кабеля и расположенные симметрично относительно траектории пучка.

Детектор CMS (Compact Muon Solenoid) содержит большой СП соленоид, который генерирует постоянное магнитное поле индукцией 4 Т на длине ~ 13 м в объеме радиусом около 3 м.

Наибольшее коммерческое применение НТСП нашли в **магнитно-резонансной томографии**.

Магнитно-резонансный томограф состоит из следующих основных блоков: магнита, градиентных, шиммирующих и РЧ катушек, охлаждающей системы, систем приема, передачи и обработки данных, системы экранирования.

В качестве источника основного магнитного поля в МРТ используются постоянные, резистивные и сверхпроводящие магниты.

В томографе с постоянным магнитом поле создается между полюсами магнита, изготовленного из ферромагнитных материалов. Такой томограф не требует дополнительной электроэнергии или охлаждения. Вес магнита накладывает ограничения на магнитную индукцию, которая не превышает 0,35 Тл.

В резистивных магнитах поле создается пропусканием сильного электрического тока по проводу, намотанному на сердечник (воздушный или стальной), и направлено параллельно продольной оси катушки. Индукция ограничена уровнем примерно 0,6 Тл, т.к. вес магнитов становится слишком большим для сильных полей. Резистивные магниты выделяют много тепла, что требует водяного охлаждения. К тому же они потребляют большое количество электроэнергии, и в целях ее экономии их обычно выключают в перерывах

между исследованиями. В то же время их открытая конструкция снижает проблему клаустрофобии.

В гибридных системах для создания магнитного поля используются совместно постоянные и резистивные магниты.

В настоящее время наиболее широко используются сверхпроводящие магниты, которые создают поля свыше 0,5 Тл. В таком магните горизонтально направленное поле создается током в проводе из сверхпроводящего материала. Провод окружен хладагентом (жидким гелием). В качестве термоизоляционной защиты используется вакуумный слой, который защищает от слишком быстрого выкипания гелия.

В табл. 4 представлены преимущества и недостатки магнитов, используемых в МРТ.

Таблица 4. Преимущества и недостатки магнитов МРТ

Тип магнита	Преимущества	Недостатки
Постоянные магниты	Низкое энергопотребление	Ограниченная магнитная индукция (<0,35 Тл)
	Низкие эксплуатационные расходы	Очень тяжелый
	Маленькое поле неуверенного приема	Нет аварийного снижения магнитного поля
	Без криогена	Нет быстрого охлаждения
Резистивные магниты	Низкая стоимость	Ограниченная магнитная индукция (<0,6 Тл)
	Легкий вес	Высокое энергопотребление
	Может быть отключен	Большое поле неуверенного приема
		Требуется водяное охлаждение
Сверхпроводящие магниты	Высокая магнитная индукция	Высокая стоимость
	Высокая однородность поля	Высокие расходы на криогенное обеспечение
	Низкое энергопотребление	Техническая сложность
	Высокое отношение сигнал/шум	Акустический шум
	Быстрое сканирование	Артефакты движения