

## ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

*И. С. Байков*

Всероссийский научно-исследовательский институт  
межотраслевой информации, Москва, Россия

*А. И. Головашкин*

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*В. С. Круглов*

РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

*А. И. Байков*

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*Данный обзор — наше представление текущего состояния и будущего развития прикладной сверхпроводимости. Даны некоторые примеры истории прикладной сверхпроводимости и намечен прогнозируемый рынок для использования сверхпроводящих изделий. Сегодняшние сверхпроводящие NMR (ядерный магнитный резонанс), MRI (магнитное резонансное отображение) и SQUID-системы и масштабные проекты ближайшего будущего, особенно в области ускорителей частиц и энергетических устройств, основаны, как правило, на металлических сверхпроводниках.*

*ВТСП предстоит все еще глительное развитие, прежде чем они будут иметь значимое воздействие на рынок сверхпроводимости, но несколько практических применений их уже начинает просматриваться. Массивные ВТСП-проводники — первые изделия, которые использованы в коммерческих системах. Изготовление и применения джозефсоновских переходов прогрессируют и могут найти использования в медицине и датчиках неразрушающего контроля. ВТСП-провода и ленты проверяются в магнитах с радиационным охлаждением или в больших полях и энергетических установках. Имеется специфическая прикладная область, которая порождает большие надежды на внедрение существующих технологий ВТСП, — использование сверхпроводников в СВЧ-полях. Ожидается, что ВТСП-пленки найдут первое широкое применение в мобильной связи и микроволновых детекторах. Дан прогноз развития будущего мирового рынка сверхпроводимости.*

Сверхпроводимость по праву занимает одно из ведущих мест в числе важнейших критических технологий, играющих принципиальную роль в развитии военного и технологического потенциала страны. Сверхпроводимость наблюдается у многих материалов при их охлаждении ниже определенной температуры  $T_c$  (характерной для данного материала) и переходе в сверхпроводящее состояние, в котором их электрическое сопротивление постоянному току полностью отсутствует, причем электрические и магнитные свойства материала в сверхпроводящем состоянии резко отличаются от этих же свойств в нормальном состоянии. Сверхпроводниками (СП) являются многие металлы (за исключением благородных, щелочных, щелочно-земельных и ферромагнитных), сплавы и соединения, некоторые сильнолегированные полупроводники, отдельные органические и полимерные вещества.

Все СП являются диамагнетиками, вытесняют магнитное поле из массивного образца (эффект Мейснера). Слабое магнитное поле проникает лишь в тонкий поверхностный слой толщиной не более нескольких сот ангстрем. В СП без диссипации может протекать постоянный электрический ток, если он не превышает критический ток  $I_c$ .

Явление сверхпроводимости было открыто Г. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. при исследовании сопротивления ртути при очень низких температурах. Было обнаружено, что при охлаждении ртутной проволоки ниже 4 К ее сопротивление скачком обращается в нуль, возникает сверхпроводящее состояние. Нормальное состояние можно восстановить, пропустив через образец достаточно сильный ток, превышающий  $I_c$ , или помещая его в достаточно сильное внешнее магнитное поле, превосходящее критическое значение  $H_c$ .

В 1950 г. В. А. Гинсбург и Л. Д. Ландау на основе теории фазовых переходов 2-го рода сформулировали феноменологические уравнения, описывающие термодинамику и электрические свойства СП вблизи критической температуры  $T_c$ .

В 1957 г. Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер сформулировали микроскопическую теорию СП, которая объяснила явление сверхпроводимости на основе бозе-конденсации куперовских пар электронов (связанные электроны с противоположными спинами и импульсами, энергия связи около тысячной доли электрон-вольта), а также позволила в рамках простой БКШ-модели описать многие свойства СП.

Важным достижением в области сверхпроводимости стало открытие в 1962 г. эффекта Джозефсона — туннелирования куперовских пар между двумя СП через тонкую диэлектрическую прослойку, что открыло принципиально новые области применения СП.

В 1986 г. Дж. Беднорц и К. Мюллер открыли новый класс металлооксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), который за последующие 10 лет пополнился многими соединениями, критические температуры которых превосходят температуру кипения жидкого азота (77 К).

Явление сверхпроводимости, открытое более 80 лет назад, лишь в последние два десятилетия начало использоваться в крупных технических приложениях. Это было связано с необходимостью создания низких (гелиевых) температур для работы соответствующих устройств, малой теплотой испарения жидкого гелия и техническими трудностями обеспечения тепловой защиты.

В технических приложениях используются оба фундаментальных свойства сверхпроводников — равное нулю сопротивление электрическому току при температурах, ниже критической  $T_c$ , и эффект Мейснера. Практически с самого начала прикладных исследований СП наметились два главных направления их применения. Во-первых, это область сильноточных устройств, т. е. создание сверхпроводящих соленоидов, двигателей, линий электропередач, левитирующего транспорта, токамаков для управляемого термоядерного синтеза, магнитных экранов и т. д. Во-вторых, это область слаботочных устройств или СП электроники, т. е. разработка (в основном на основе эффекта Джозефсона) сверхчувствительных детекторов магнитного поля (сквидов), пассивных СВЧ-элементов, СП томографов для медицины, элементов ЭВМ и цифровых приборов и т. д.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников в 1987 г., т. е. материалов с критическими температурами, превышающими температуру кипения жидкого азота (77,3 К), породило большие надежды на быстрое внедрение их в практику и дало мощный импульс дальнейшему исследованию СП. Замена гелиевых температур на азотные (которые можно получать и на основе достаточно простых рефрижераторных систем) резко упростило и удешевило бы криогенные системы, необходимые для работы с СП. Это упрощение тепловой защиты и удешевление криоагента столь велико, что несколько лет назад эксперты полагали, будто открытие ВТСП окажет революционизирующее влияние практически на все промышленные технологии. Однако сложность ВТСП-соединений, необычность их свойств, трудности создания материалов и проводов с нужными параметрами на их основе выдвинули ряд принципиальных проблем, препятствующих быстрому и широкому прогрессу в области использования ВТСП.

В настоящее время, несмотря на интенсивные исследования в области использования ВТСП и известные факты конкретных приложений, все еще отсутствуют широкомасштабные применения ВТСП. В то же время продолжают расширяться области применения обычных (низкотемпературных) сверхпроводников (НТСП), осуществлен и осуществляется ряд крупных проектов, основанных на использовании НТСП. В ряде случаев проекты на основе НТСП служат прообразом последующих вариантов на основе ВТСП.

Главные направления исследований и приложений в области сверхпроводимости можно определить как:

1. Фундаментальные исследования, включающие в себя изучение свойств ВТСП, природы сверхпроводимости в них, создание ВТСП-материалов с нужными свойствами, в частности, изучение возможностей создания ВТСП-материалов с критическими температурами, приближающимися к комнатным, разработку физических основ сверхпроводниковой наноэлектроники, изучение проблемы долговременной стабильности ВТСП-элементов и устройств, работающих в нестандартных условиях, в условиях автономного использования.

2. Сильноточные приложения, имеющие целью создание крупных силовых электротехнических установок, линий электропередач, кабелей, накопителей энергии, токамаков, левитирующего транспорта, автономных компактных двигателей и других систем, в частности, систем двойного назначения.

3. Сверхпроводниковая электроника, в том числе микроэлектроника на основе ВТСП, включающая в себя СВЧ-электронику, сверхчувствительную магнитометрию и томографию, детекторы, цифровую электронику, ЭВМ и т. д.

### ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Электрическое сопротивление в обычных проводниках ограничивает параметры и вызывает нежелательные потери мощности в существующих электрических, электронных и электромагнитных приборах и системах (линии передач, ЭВМ, электрические двигатели и генераторы). В рассматриваемой технологии используется эффект отсутствия сопротивления электрическому току и другие уникальные свойства СП для создания датчиков, электронных приборов и подсистем, а также систем на основе сверхпроводящих магнитов. Создание сверхпроводящих приборов означает возможность колоссального уменьшения затрат энергии на охлаждение, значительного повышения быстродействия и сокращения размеров приборов и микросхем. Технология на основе СП позволяет создать уникальные по чувствительности детекторы (в частности, для измерения гравитационных волн), высокоизбирательные по частоте аналоговые фильтры и многое другое, практически не достижимое другими методами.

Рассматриваемые технологии СП включают низкотемпературные сверхпроводники, температура перехода которых меньше 23 К, и новые ВТСП, температура перехода которых достигает 135 К.

Наиболее типичным и широко используемым НТСП является коррозионно-стойкий сплав ниобия и титана, имеющий достаточно высокие сверхпроводящие параметры, простота обработки которого позволяет изготавливать сверхпроводящие магниты на его основе.

Хрупкие металлические НТСП, например  $Nb_3Sn$ , имеют лучшие параметры (более высокую плотность тока при больших значениях магнитного поля и температуры), но вследствие хрупкости структуры с трудом поддаются обработке. НТСП на основе ниобия и нитрида ниобия широко используются для изготовления сверхпроводящих датчиков и электронных приборов. Из этих же материалов успешно изготавливаются большие решетки переходов Джозефсона.

ВТСП по сравнению с НТСП имеют более высокие значения рабочей температуры и магнитного поля. Они позволяют осуществлять дальнейшее снижение требований к охлаждению и использовать вместо хладагента гелия жидкий азот, что сильно расширяет возможности практического использования СП.

ВТСП обеспечивают плотность электрического тока, достаточную для разнообразных применений в области электроники, однако многие ВТСП характеризуются высокой анизотропией свойств, хрупкостью, чувствительностью к влаге. Из ВТСП технологически труднее, чем из НТСП, изготавливать сверхпроводящие магниты, электронные приборы, датчики, пассивные магнитные пеленгаторы.

Военные и гражданские исследования и разработки в области СП фокусируются как на низко-, так и на высокотемпературных СП, поскольку оба направления являются ключевыми для раскрытия возможностей рассматриваемой технологии. Они охватывают вопросы теории СП, изучение характеристик материалов, технологию их обработки, создание СП-материалов с новым составом и структурой, моделирование испытаний и создание операционных систем.

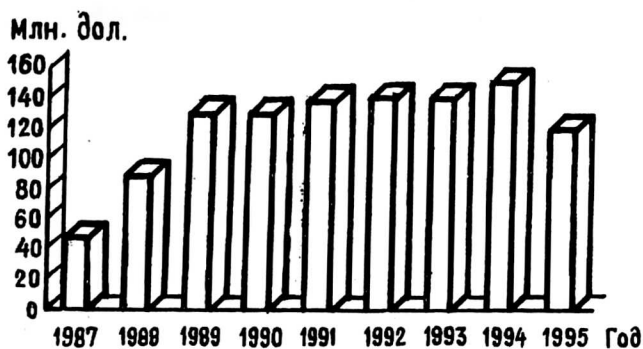
Рассматриваются основные свойства СП, вопросы производства и изготовления СП различной конфигурации, а также приборов и систем на их основе. В сверхпроводниковых приборах используются свойства прохождения через СП постоянного и переменного тока практически без потерь, явления левитации и экранирования магнитных и электромагнитных полей, чувствительность к слабым магнитным и электромагнитным полям, передача электрических сигналов с очень малыми искажениями, способность выполнять функции аналоговых и цифровых электронных приборов с быстроедействием в 10—30 раз выше и рассеянием мощности в 1000 раз меньше, чем это возможно для полупроводниковых приборов. Критическим для всех этих применений является использование эффективных и надежных систем охлаждения. Технологии на основе НТСП-магнитов применяются при создании магнитных возбудителей, систем питания и корабельных двигательных установок. Усилия в области ВТСП-магнитов концентрируются пока на более элементарных вопросах: материалах, обработке проводников и конструировании простейших магнитов. При создании датчиков и электронных приборов на основе ВТСП и НТСП акцент делается на разработку пассивных приборов, детекторов, активных приборов на переходах Джозефсона, цифровых логических ИС и ЗУ.

Технология разработки НТСП развита до такой степени, что в мире насчитываются тысячи сверхпроводящих магнитов, работающих в высокоэнергетических ускорителях заряженных частиц и в формирователях изображения на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Сделаны первые шаги в использовании НТСП в военных системах, например, в малогабаритных эффективных корабельных системах электропривода. Достигнут высокий уровень разработки датчиков и аналоговых электронных приборов на НТСП, заметно отстают разработки цифровых электронных приборов на НТСП (Япония здесь значительно опережает США). В целом технология НТСП полезна и выгодна не только сама по себе, но и с точки зрения использования для моделирования систем, в которых позднее можно применить ВТСП, когда удастся избавиться от присущего им недостатка — хрупкости.

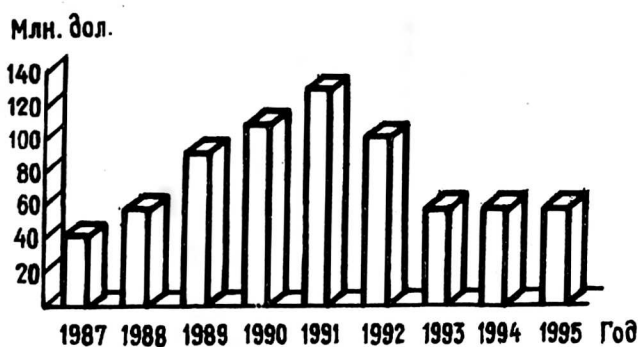
Реализация перспективных возможностей ВТСП требует значительных и продолжительных инвестиций в исследования и разработки в этой области, что связано с трудностями обработки материалов. Первоочередными задачами являются производство высококачественных пленок и разработка техники формирования литографического рисунка наряду с созданием технологии объемных ВТСП с высокой плотностью тока для устройств передачи мощности, сверхпроводящих магнитов, двигателей, генераторов.

Разработки в области ВТСП ведутся последовательно — от пассивных аналоговых электронных приборов к датчикам электромагнитного излучения, цифровым электронным приборам, небольшим магнитам и более крупным.

Федеральные инвестиции США на развитие исследований и разработок в области сверхпроводимости за последние годы представлены на рис. 1, а, б.



а



б

Рис. 1. Федеральные инвестиции в США:  
а — на ВТСП; б — на НТСП

Федеральные фонды обеспечивают финансирование прежде всего университетов, национальных лабораторий и компаний, выполняющих заказы министерств обороны и энергетики в интересах национальной безопасности. Государственная поддержка оказывается в основном министерствам обороны и энергетики, НАСА, Национальному научному фонду и Министерству торговли.

Ассигнования на НТСП в США достигли своего пика в 1991 г. (130 млн. дол.), затем упали и в 1993—1995 гг. оставались примерно на уровне 60 млн. дол. Ассигнования же на ВТСП в первые три года после открытия высокотемпературной сверхпроводимости резко росли, затем почти стабилизировались, достигнув наивысшего уровня (150 млн. дол.) в 1994 г. В 1995 г. они упали примерно до 120 млн. дол. ввиду закрытия ряда проектов. В последние годы в США прекращено финансирование проектов создания СП-суперколлайдера, гигантских СП-накопителей магнитной энергии и левитирующего транспорта на магнитной подушке.

Вклад частных фирм в исследования и разработки по сверхпроводимости примерно равен федеральным фондам. Некоторые особо перспективные применения СП (наиболее коммерческие и конкурентоспособные) целиком финансируются частными фирмами. Среди них можно отметить разработки телекоммуникационных систем и приборов для медицины. Например, в 1994 г. АТТ Bell и

Illinois Superconductor Corp. разработали ВТСП-фильтры для систем сотовой телефонной связи. По оценкам экспертов, в настоящее время рынок базовых станций сотовой телефонной сети превысил 5 млрд. дол./год. ВТСП-фильтры для базовых станций позволяют улучшить качество звука (отсекая городской радиочастотный шум) и увеличить число каналов, поддерживаемое каждой ячейкой. После демонстрации своих изделий эти компании получили крупные заказы (в десятки млн. дол.) на изготовление и поставку этих фильтров. Лидерами в разработке и изготовлении на основе тонких СП-пленок электронных приборов микроволнового диапазона являются Du Pond, MIT Lincoln Lab, Conductus, Superconductus Technologies Incr., которые имеют крупные коммерческие заказы от DOD (Министерства обороны).

Для сравнения, ассигнования на исследования по сверхпроводимости в 1994 г. в Европе составляли 128 млн. долл. (без стран СНГ), а в Японии — 226 млн. дол.

В 1993 г. группа из 15 европейских компаний образовала Консорциум "Conectus", имеющий целью применение в различных приложениях достижений научных лабораторий в области сверхпроводимости. Эксперты Консорциума оценивают мировой рынок сверхпроводниковых устройств в 1995 г. примерно в 2,67 млрд. дол., причем на европейскую часть полного рынка приходится около 45 %. Их прогноз развития рынка до 2020 г., выполненный в июне 1995 г., представлен в табл. 1.

Рынок СП-устройств, млрд. дол.

Таблица 1

Сектор рынка	1995 г.	2000 г.	2010 г.	2020 г.
Электроника	—	2	7,1	38,5
Энергетические устройства (накопители, магниты, трансформаторы, моторы, генераторы, кабели и т. д.)	—	0,2	7,4	47
Транспорт	—	—	0,2	6,1
Медицина и наука (магнитная томография, ЯМР, ускорители, сенсоры и т. д.)	2,67	4,1	8	16,5
Обрабатывающая техника (ЯМР, магнитные сепараторы, левитация, контроль реакций, сенсоры и т. д.)	—	0,4	3,3	16

Из табл. 1 видно, что СП-рынок в 2000 г. превысит 5 млрд. дол. и будет увеличиваться в пять раз каждые 10 лет. При этом в прогнозе не учитывалась возможность крупных технологических прорывов, т. е. считалось, что технология останется на современном уровне.

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

##### *Современные и будущие системы оружия*

Возможные области применения СП-материалов, уже испытанных в опытных образцах приборов на НТСП, — это компактные и эффективные электродвигатели для кораблей и подводных лодок (возможно, для наземных транспортных средств и ЛА), электрические генераторы, накопители электрической энергии (СПИН — сверхпроводящие индуктивные накопители) для оружия направленной энергии, ускорителей заряженных частиц резонаторного типа для оружия направленной энергии, электромагнитные пушки и самолетные катапульты, магнитные и электромагнитные экраны, супермагниты и резонаторы для генерации излучения СВЧ- и мм-диапазонов. К другим применениям в области военной электроники и приборостроения можно отнести датчики магнитных и электромагнитных полей (от постоянного тока до ИК-диапазона), матричные ИК-фотоприемники, СКВИДы, магнетометры и градиометры, гидролокаторы большой мощности, сверхминиатюрные процессоры обработки сигналов и ЭВМ,

узкополосные фильтры и миниатюрные линии задержки с низким уровнем потерь, высокоэффективные системы связи и наблюдения с низким уровнем шумов, СП-антенны и гироскопы, инерциальные датчики, гравиметры и магнитные миноискатели.

Многие из перечисленных систем являются уникальными, не имеющими аналогов, построенных на обычных проводниках (например, СПИН, СКВИД и др.). Магнитные СКВИДы позволяют разрабатывать новые системы обнаружения бесшумных подводных лодок. Оснащение ЛА и ИСЗ сверхбыстродействующими бортовыми суперЭВМ возможно лишь при использовании СП элементной базы; в настоящее время этому препятствует высокое энергопотребление полупроводниковых систем с громоздким охлаждением.

### *Потенциальный вклад в гражданский промышленный сектор*

Разработка малогабаритных эффективных двигателей и генераторов, кабелей с низкими потерями для линий электропередачи и накопителей энергии приведет к более экономичному распределению и потреблению электроэнергии. Такие системы более устойчивы к перебоям энергии, легче подвергаются ремонту благодаря меньшим габаритным размерам и допускают локальный контроль за распределением энергии в целях совершенствования промышленного производства. ЯМР-томографы (ежегодный объем производства которых достигает 1 млрд. дол.) станут более доступными для повседневного использования, что позволит свести к минимуму хирургическое вмешательство при диагностике заболеваний. Разработка СП электронных приборов даст возможность создать более совершенные суперЭВМ. Перспективные задающие генераторы с высокой стабильностью позволят увеличить спектральную плотность излучения в системах связи. СКВИДы найдут применение в медицине для контроля и диагностики функций головного мозга.

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЦЕЛИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОГРАММ США ПО ВОЕННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ СП ДО 2000 г.**

Основной задачей технологии, ориентированной на военные применения, является разработка СП и приборов на их основе.

#### *Долгосрочные цели разработки НТСП технологии:*

- широкое военное применение аналоговых и цифровых электронных приборов на основе ниобия в сверхбыстродействующей аппаратуре распознавания и обработки сигналов в реальном времени для платформ с оружием наземного, морского, воздушного и космического базирования;
- разработка цифровых логических ИС, ЗУ и датчиков на НТСП, а также аналоговых процессоров обработки сигналов и логических ИС на единичных квантовых потоках с рабочими частотами в сотни гигагерц, аналоговых приемников для систем связи и наблюдения;
- разработка корабельных приводных систем и МГД двигательных установок, магнитных возбудителей и СПИН для систем питания оружия направленной энергии.

#### *Долгосрочные цели разработки ВТСП технологии:*

- создание приемников для систем связи и наблюдения с использованием технологии изготовления тонкопленочных пассивных электронных компонентов с малыми потерями в радиочастотных диапазонах;
- разработка технологий создания перспективных датчиков и процессоров обработки сигналов на переходах Джозефсона и структурах со слабой связью;
- создание магнитов для новых областей применения и модернизация существующих из НТСП.

Намечено разработать решетки туннельных переходов высокого качества на ВТСП с более высокой температурой, ВТСП-керамику с большой плотностью критического тока, ВТСП-провода длиной более 1 км и током  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>, ВТСП-пленки большой площади для защитных экранов и объемных резонаторов, матричные ИК-фотоприемники, инерциальные и гироскопические датчики на ВТСП, а в области электронных приборов — аналоговые системы связи и наблюдения; процессоры обработки цифровых сигналов и ЗУ на основе Nb/NbN; цифровые ИС на ВТСП; аппаратуру ИСЗ на ВТСП; в области транспорта — действующие электрические машины; МГД двигатели для кораблей. Намечено завершить разработки системы магнитного обнаружения подводных лодок и создать электромагнитную пушку.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТСП В КОСМОСЕ

Необходимость использования громоздкого криогенного оборудования для обеспечения функционирования приборов на ВТСП ограничивает их применение в космосе, тогда как ВТСП, рабочая температура которых выше 80 К, допускают обычное радиационное охлаждение.

Предполагается значительно повысить параметры космических аппаратов за счет лучшей развязки сигнала с помощью фильтров высокой добротности, линий задержки и линий передачи без потерь, детекторов излучения, чувствительных в широком диапазоне электромагнитного спектра (от СВЧ до ИК-диапазона), матричных ИК-фотоприемников и ламп бегущей волны (ЛБВ), выполненных на ВТСП. Датчики, выполненные на основе СП, обеспечивают обнаружение, соответствующее теоретическим возможностям.

### КОНКРЕТНЫЕ ПРИМЕРЫ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ СП

#### *Сверхпроводящие обмоточные провода*

Реальный промышленный выпуск обмоточных проводов и токонесущих элементов налажен только на основе ниобий-титановых (НТ) сплавов (примерно в равной доле компонент) и интерметаллида Nb<sub>3</sub>Sn. Наибольшее распространение получили НТ-провода, имеющие хорошие деформационные характеристики и приемлемую стоимость (~2 дол. за килоамперметр). Производство ниобий-оловянных (НО) технических проводов более трудоемко, поэтому и цены на них в несколько раз выше, чем на НТ-провода.

Основной метод получения НТ-проводов — многократная композиционная сборка и термомеханическая обработка. НО-провода изготавливаются в основном по т. н. "бронзовой технологии", основой которой является деформация заготовок, состоящих из внедренных в оловянистую бронзу ниобиевых волокон с заключительной термообработкой для образования Nb<sub>3</sub>Sn. Сверхпроводники характеризуются термомагнитной неустойчивостью, заключающейся в инициировании малыми возмущениями температуры или поля скачкообразного магнитного потока с характерным временем  $10^{-5}$  с и, соответственно, интенсивного тепловыделения, что приводит к переходу материала в нормальное состояние. Для предотвращения этого СП разбивается на волокна с поперечным размером менее  $10^{-4}$  м. Сохранность провода при аварийном переходе достигается введением в технический провод высокопроводящего материала, как правило, меди, объем которого может достигать 90 %. В силу вышесказанного современный ВТСП-провод для намотки магнитных систем имеет длину до нескольких десятков километров, содержит сотни тысяч тонких волокон, несколько микрон в диаметре, распределенных особо рассчитанным образом в матрице, играющей роль стабилизатора, упрочнителя, диффузионного барьера и т. д.

В рамках СНГ единственным предприятием-изготовителем НТСП-материалов является ПО "Ульбинский металлургический завод" (г. Усть-Каменогорск, Казахстан). Опытные производства, рассчитанные на выпуск нескольких тонн обмоточных проводов, имеются в России во ВНИИ неорганических материалов им. А. А. Бочвара и НПО "Горизонт".

Широкий ассортимент отечественных промышленных НТСП-материалов позволяет полностью удовлетворять существующие национальные потребности в них, имея при этом эксплуатационные характеристики на уровне мировых стандартов. Стандартные значения критической плотности тока составляют  $10^5$  А/см<sup>2</sup> для НТ- и НО-проводов в полях 5 и 12 Тл, соответственно.

Промышленное производство ВТСП-проводов находится в стадии освоения, но широкий выпуск технических проводов с требуемыми свойствами ожидается в следующем десятилетии, поскольку требования к соответствующим технологиям получения неизмеримо выше, чем для традиционных НТ-материалов. Существенным ограничением на пути широкого промышленного использования современных лабораторных ВТСП-проводов остается пока и их очень высокая стоимость.

### Сверхпроводящие магниты

Сверхпроводящие магниты (СМ) — это электромагниты, в которых создающий магнитное поле ток протекает в основном по СП, в результате омические потери в обмотке СМ весьма малы. В существующих СМ провода обмотки выполняются из волокон НТСП (сплав ниобия с титаном, соединения типа А-15: Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga), заключенных в матрице из несверхпроводящего металла. Обмотку СМ помещают в криостат, поддерживающий рабочую температуру ниже T<sub>c</sub> проводов. Параметры СМ ограничены свойствами СП-провода: критической температурой, критическим магнитным полем и критическим током. Ниобий-титановые СМ позволяют получать при 4,2 К магнитную индукцию до 10 Тл, а ниобий-оловянные — до 20 Тл. Первые СМ из НТСП были созданы в 1961 г. Производство СМ из ВТСП связано с большими трудностями из-за хрупкости материала проволоки. Пока эта проблема решается путем разработки магнитов с очень малой кривизной обмотки или в рамках технологии изготовления обмотки из прессованных порошков в серебряных оболочках с последующим отжигом до образования СП-керамики. Разрабатываются и другие методы: на основе порошка (золь-гель, экструзия, трафаретная печать); методы плавления (лазерные, стеклокерамические, вытягивание из расплава, плавление готового провода, текстурирование в процессе плавления, пластическая экструзия, плазменное распыление); нанесение покрытия (распыление, химическое паровое осаждение, электронно-лучевое испарение). Плотность тока в коротких образцах достигла  $2 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup> при 4,2 К, что в 200 раз превышает соответствующую величину для медных проводников, и  $3,5 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> при 77 К.

American Superconductor (США) освоила технологию скручивания ВТСП-проводов километровой длины. В Los Alamos National Lab созданы образцы гибкой YBCO-ленты, которая более устойчива к магнитным полям (не теряет СП-свойства), чем производимые висмутовые ВТСП-провода.

Преимуществами СМ перед обычными резистивными электромагнитами являются малое потребление энергии, в основном на компенсацию теплоты, поступающей через теплоизоляцию криостата, по несверхпроводящим тоководам, а также тепловыделения в омических контактах между отрезками СП-провода. В СМ с постоянной индукцией расход энергии, по крайней мере, в тысячу раз меньше, чем омические потери в резистивных обмотках обычных электромагнитов такого же назначения. Капитальные затраты на создание крупных СМ сопоставимы с затратами на создание резистивных электромагнитов — относи-

тельно высокая стоимость СП-обмотки компенсируется отсутствием необходимости в мощных источниках питания и громоздких системах ее водяного охлаждения. Максимальные размеры СМ ограничиваются не энергетическими соображениями, а прочностью материалов, из которых изготавливают бандаж СМ. Существуют проекты СМ с характерными размерами в сотни метров. Рабочая температура современных СМ лежит в диапазоне 1,8—10 К, хладагентом служит жидкий или газообразный гелий. В особо крупных или сложной конфигурации СМ часто используют циркуляционное охлаждение путем направления потока хладагента по герметичному каналу, совмещенному с обмоточным проводом.

Специфический недостаток СМ — возможность выхода из рабочего режима вследствие потери обмоткой сверхпроводимости (даже, если значения индукции и температуры соответствуют расчетным рабочим параметрам СМ). Это явление называется деградацией СП-провода в обмотке. Деградации в большей степени подвержены крупные СМ и некруглой формы, имеющие обмотку из провода с толстыми волокнами, с высокой токонесущей способностью.

Для борьбы с деградацией уменьшают частоту и амплитуду механических возмущений (провод закрепляется по всей длине обмотки, саму обмотку делают возможно более жесткой, используют обмоточный провод с весьма тонкими СП-волокнами (0,1—30 мкм), скрученными вокруг продольной оси и др.).

СМ уже нашли широкое применение в научном приборостроении. СП-соленоиды с индукцией до 16 Тл используются для исследований в физике твердого тела и испытаний СП-материалов. В ЯМР-спектрометрах используют высокостабильные СМ с короткозамкнутой обмоткой и характерным временем изменения магнитного поля до  $10^{10}$  с.

СМ в физике высоких энергий служат в качестве отклоняющих, фокусирующих и анализирующих магнитов. Особо крупные СМ применяются в физике плазмы и в прототипах термоядерных реакторов. Установка "Токамак Т-15" (введена в 1989 г.) имеет тороидальный СМ с запасенной энергией до 1 ГДж. ЯМР-томографы с СМ используются в медицине. Во всех вышеперечисленных примерах СП-магниты создавались на основе НТСП. Однако уже созданы, например в Intermagnetics General и Texas Center for Superconductivity (Univ. of Houston), различные магниты из купратных ВТСП, которые могут создавать магнитные поля до 2 Тл, что в пять раз превышает величину поля в лучших современных резистивных магнитах той же топологии.

В 1994 г. созданы первые коммерческие "cryogen free" СМ на основе  $Nb_3Sn$  (обмотка охлаждается за счет собственной теплопроводности) почти одновременно в Японии, Великобритании и США. Внедрение обмотки из  $Bi(2223)$ -ленты позволило поднять рабочие температуры СМ до 20 К; в Японии (Sumitomo) достигнуты поля 3 Тл при 21 К.

В начале 1995 г. было объявлено о проекте сооружения в CERN (Женева) Большого адронного коллайдера (LHC — Large Hadron Collider). Проект требует строительства примерно 1300 дипольных СМ длиной 13,5 м с полем 8,65 Тл и почти 600 квадрупольных СМ длиной 3,2 м с градиентом поля 220 Тл/м. Этот проект будет крупнейшим потребителем  $NbTi$ -проволоки в ближайшем будущем.

Реализация другого грандиозного проекта — Международного термоядерного экспериментального реактора (ITER) — огромная стимуляция развития промышленного производства  $Nb_3Sn$ -провода, поскольку из-за высокого магнитного поля (до 13 Тл) должен использоваться ниобий-оловянный провод. На строительство ITER потребуется около 35 000 км шин из СП-материала (~1600 т), что примерно на два порядка превышает годовой объем его мирового производства.

*Магниты для детекторов частиц высоких энергий.* Без СМ в настоящее время было бы невозможно создать такие крупные детекторы частиц высоких энергий,

как водородная пузырьковая камера, работающая в ЦЕРНе (объем СМ магнита  $70 \text{ м}^3$ , запасенная энергия — порядка гигаджоуля), или детекторы для линейного ускорителя LEP (ЦЕРН) с соленоидами на основе NbTi диаметром 5 м и длиной 6—7 м, создающими поля  $\geq 1,5 \text{ Тл}$ .

С развитием нового поколения ускорителей появилась потребность и в новых СМ-детекторах частиц с более высокими магнитными полями. Недавно запущен один из таких детекторов с полем 3,5 Тл и примерно таким же объемом, как у вышеупомянутых детекторов [16]. В настоящее время разрабатывается новый комплексный детектор для ускорителя LHC (ЦЕРН). Его тороидальная магнитная система имеет прямоугольную форму длиной 26 м, внутренний диаметр тора 9,4 м, внешний 19,5 м. Максимальное поле в торе 4,2 Тл. Катушки намотаны кабелем NbTi в Al-оболочке.

Эксперты считают, что будущее физики высоких энергий связано именно со СМ-магнитными системами.

*ЯМР-спектрометры.* С 1987 г. максимальная частота для коммерческих систем поднята с 600 до 750 МГц. Это потребовало создания соленоидальных СМ с полем в центре 17,6 Тл и обеспечения его пространственной однородности  $\Delta B/B < 10^{-7}$  в объеме  $1 \text{ см}^3$ . Более трудно добиться постоянства магнитного поля во времени. Для систем, применяемых в физике твердого тела, необходимо  $\Delta B/B < 10^{-5}$  в час, а в спектрометрах высокого разрешения для химии и биологии  $\Delta B/B < 10^{-8}$  в час.

Сооружение 1000 МГц-систем, соответствующих полям 23,5 Тл, кажется вполне реальным, учитывая быстрый прогресс в производстве ВТСП Bi-проводов. Основные технические трудности их создания будут связаны с достижением требуемой пространственной однородности и постоянства во времени магнитного поля.

*СП-моторы.* Оценки показывают, что ВТСП большие синхронные электромоторы (1—10 МВт), работающие при 77 К, экономичнее существующих индукционных за счет сокращения потерь.

Reliance Electric Corp. и ASC (США) разрабатывают такие моторы на ВТСП Bi-проводах в роторе. В созданном демонстрационном моторе мощностью 3,75 кВт применены обмотки из гибких ВТСП-проводов длиной 670 м, поставленных American Superconductor; готовится модель на 100 кВт. Однако для полномасштабного применения новых СП-моторов потребуются провода большей длины (километровые) с критическим током  $10^5 \text{ А/см}^2$  при 77 К в полях до 5 Тл, создание которых пока еще не осуществлено.

### *Накопители энергии на основе магнитных подшипников*

В Аргонской Национальной лаборатории США достигнуто рекордно малое трение в магнитных СП-подшипниках на основе ВТСП. Коэффициент трения для массивного маховика, используемого для накопления энергии, в этом случае в 1000 раз меньше трения лучших шариковых подшипников.

*Магнитные СП (бесконтактные) подшипники* для автоматической лунной обсерватории созданы в Центре по изучению космического пространства НАСА (США), где и идет разработка этой обсерватории (медленные, гладкие перемещения, что и нужно).

### *Трансформаторы*

Современные мощные трансформаторы уже имеют высокую эффективность (~99,4 % и более). Однако возможная экономия даже оставшихся малых потерь, суммированных за длительный период эксплуатации в 30—40 лет, оправдывает

разработку СП-трансформаторов. Имеются две главные трудности при их создании. Первая трудность заключается в том, что проводник должен иметь очень малые потери на переменном токе, вторая — в устранении случайных скачков тока (в обычных трансформаторах они могут вызвать кратковременные скачки тока до 20 раз). Требуемая малая величина потерь уже достигнута в NbTi/CuNi-проводах с очень тонкими микронными волокнами ( $\sim 20$  мкВт/(А·м) в поле 0,1 Тл при частоте 50 Гц), которые были использованы в демонстрационном трансформаторе на 330 кВ·А [7]. Эта модель подтверждает основные принципы разработки СП-трансформатора и получения предсказываемой экономии в массе и габаритах. Перспективная область применения СП-трансформатора — железнодорожный транспорт. На это нацелен Франко-Германский проект (GEC/Alstom-Siemens) создания трансформатора на NbTi/CuNi-проводе.

ВТСП-трансформатор создается Американской СП корпорацией (ASC) совместно с рядом других организаций из Германии, Швеции на 630 кВТ (18,7 кВ / 420 В) с демонстрацией в 1997 г. в качестве первого шага для развития больших, коммерческих трансформаторов, которые будут иметь большую эффективность, меньшие массу и размеры, дешевле в эксплуатации, чем применяемые в настоящее время, являясь также экологически безвредными (жидкий азот вместо масла).

Планируется в демонстрационном образце достичь  $I_c > 10^4$  А/см<sup>2</sup> при поле 0,3 Тл и 77 К с индуктивными потерями менее 0,25 мВт/(А·м). СП-трансформаторы станут конкурентоспособными по сравнению с обычными при снижении существующих цен на СП-провода в четыре-пять раз.

### Прочие применения

*Сверхпроводящие провода и ленты.* Являются основой всех сильноточных устройств. В сверхпроводящих лентах на основе ВТСП  $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , изготовленных методом "Ag проволока в трубке", достигнуты транспортные критические плотности тока  $2 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup> при  $T = 77$  К [1].

*Токоограничители.* General Dynamics и American Superconductor разрабатывают коммерческую систему ВТСП-токоограничителей для "гашения" бросков тока. Экономия за счет внедрения ВТСП токоограничителей в энергосистему США оценивается в 100 млн. дол. в год за счет сокращения стоимости ремонтных работ.

*Кабели.* Разрабатываются в двух направлениях: беспробойные для передачи сверхбольших энергий ( $\geq 1$  ГВ·А) и средних (300—400 МВ·А) для замены существующих подземных кабелей ( $\sim 100$  МВ·А). Для СП-кабелей требуются материалы с  $I_c \sim 10^5$  А/см<sup>2</sup>, причем индуктивные потери проводника не должны превышать 0,1 Вт/м. Такие величины кажутся трудно достижимыми при сопоставлении с существующим уровнем производства Bi-проводов, но могут быть реализованы в будущем.

Замена обычных подземных электрических кабелей в густонаселенных районах США на СП экономит до 15 % мощности за счет устранения резистивных потерь и обеспечит более стабильное напряжение, а это, в свою очередь, обеспечит стабильную работу компьютеров (и экономию средств), входящих в повседневную жизнь каждого члена общества.

## СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

### Перспективы использования ВТСП в микроэлектронике

Направление "Сверхпроводниковая электроника" включает в себя разработку и создание базовых элементов, интегральных схем и приборов на основе СП.

К моменту открытия ВТСП в 1987 г. был уже накоплен определенный опыт и достигнут значительный прогресс в создании элементов и приборов НТСП-электроники, требующих для своей работы жидкого гелия. Появление ВТСП открыло новые возможности в этой области и дало дополнительный толчок работам. В последние годы подавляющее большинство работ в области СП-электроники связано с исследованием и применением для прикладных целей ВТСП-материалов.

По мнению специалистов микроэлектроника является наиболее перспективной и реальной областью крупномасштабного применения ВТСП. Поэтому во всем мире наиболее важными объектами исследований по сверхпроводимости являются ВТСП-пленки и структуры на их основе. Этим вопросам посвящены обзоры [2, 3], здесь же обсуждается проблема сопряжения сверх- и полупроводниковой технологий.

Главные направления работ в области СП-электроники:

- аналоговые приборы — сквиды, приемники, стандарты Вольты, триоды различного типа и др.;
- пассивные СВЧ-устройства;
- цифровые ИС, включая элементы ЭВМ.

Ожидаемое повышение чувствительности, понижение энерговыделения, уменьшение массы и габаритных размеров по сравнению с существующими образцами, возможность работать при азотных температурах, снижение стоимости привлекают пристальное внимание фирм к ВТСП-электронике (микроэлектронике). Эти качества и возможность обходиться без жидкого гелия делают приборы на основе ВТСП весьма выгодными для автономных систем.

Хочется отметить важное зарождающееся направление СП-нанозлектроники. Речь идет о создании элементов и первых устройств (триоды, элементы логики) на основе туннелирования отдельных сверхпроводящих пар ("СП одноэлектроника"). Размер отдельного джозефсоновского элемента в этом случае меньше  $0,01 \text{ мкм}^2$ . Как пример первых достижений ВТСП-нанозлектроники, отметим возможность резкого увеличения критических токов в очень узких ВТСП-мостиках. Показано, что в таких мостиках величина критического тока может превышать  $10^9 \text{ А/см}^2$ , т. е. достигать токов распаривания Гинзбурга-Ландау. Столь высокий предел критических токов в наноструктурах из ВТСП может быть использован в необычных приложениях. В джозефсоновских переходах на основе ВТСП достигнуты огромные, по сравнению с обычными СП, значения характерного напряжения  $U_c = 5-7 \text{ мВ}$ . Это открывает перспективы значительного увеличения рабочих или тактовых частот, которые могут быть использованы в различных СВЧ- или цифровых устройствах.

Несмотря на вышесказанное, рассчитывать сейчас на ширококомасштабные приложения сверхпроводимости в электронике можно лишь в том случае, если не только удастся преодолеть трудности, связанные с созданием отдельных материалов или приборов, но и разработать вспомогательные системы, цепи и устройства (включая криогенику), обладающие исключительно высокими параметрами.

К настоящему времени в научных лабораториях многих стран на основе ВТСП-пленок разработан достаточно широкий ассортимент пассивных приборов СВЧ-диапазона (фильтры, мультиплексоры, линии задержки, резонаторы), широкополосные детекторы на основе переходов Джозефсона, СКВИДы высокого разрешения (до  $10^{-32} \text{ Дж/Гц}$ ), быстродействующие переключатели тока (времена переключения ~ десятков наносекунд). Компоненты пассивных приборов широко используются в бортовой аэрокосмической аппаратуре, где к рабочим характеристикам и габаритным размерам предъявляются чрезвычайно высокие требования. Пассивные компоненты, выполненные по полупроводниковой технологии,

составляют свыше 50 % объема радиоэлектронного оборудования спутников связи. Внедрение ВТСП-приборов позволит значительно уменьшить габаритные размеры и массу спутников.

## КОНКРЕТНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В СП-ЭЛЕКТРОНИКЕ

### *Аналоговые сверхпроводящие приборы*

На основе как НТСП, так и ВТСП активно разрабатываются и совершенствуются такие устройства и приборы, как сквиды различного типа, приемники, стандарты Вольта, различные трехэлектродные устройства (триоды).

### *Сквиды и матрицы сквидов*

Достигнутая энергетическая чувствительность коммерческих НТСП-сквидов постоянного тока превышает  $10^{-30}$  Дж/Гц, а ВЧ-сквидов достигает  $10^{-29}$  Дж/Гц. Эти значения намного превосходят чувствительность, требуемую для большинства метрологических и геофизических приложений. Чувствительность ВТСП-сквидов приближается к этим цифрам, а лучших НТСП-сквидов (ниобиевых) с трансформатором магнитного потока достигает  $5 \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ , или  $5 \cdot 10^{-11} \text{ Э} / \sqrt{\text{Гц}}$  (эффективная площадь петли сквида  $2 \text{ мм}^2$ ). Лучшие ВТСП-сквиды достигают соответственно чувствительности: по потоку  $2 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ , по полю —  $2 \cdot 10^{-9} \text{ Э} / \sqrt{\text{Гц}}$  (при эффективной площади петли  $0,2 \text{ мм}^2$ ).

Отметим некоторые из последних достижений в создании сквидов.

В Университете Беркли (США) созданы тонкопленочные многопетлевые магнитометры (сквиды) на основе ВТСП. Магнитометр имеет 16 параллельных петель. Пленки представляют собой гетеросистему  $\text{YBaCuO}/\text{SrTiO}_3/\text{YBaCuO}$ . Магнитный шум при  $T = 77 \text{ К}$  не превышает  $2 \cdot 10^{-10} \text{ Э} / \sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 кГц.

В Исследовательском центре Юлиха (Германия) создан ПТ-сквид на основе пленочных наномостиков  $\text{YBaCuO}$  (ширина 100—500 нм). На его основе созданы вихревые СП-транзисторы, работающие при  $T = 4,2\text{—}85 \text{ К}$  и имеющие шум менее  $8 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ .

Чрезвычайно перспективно создание матриц сквидов для исследований и функциональной диагностики в неврологии и кардиологии. В перспективе предполагается реализовать цифровое считывание для сквидов на основе достаточно сложных криоэлектронных систем, способных исключить шумы комнатной электроники. Такие системы на основе ВТСП-сквидов весьма перспективны. Узким местом здесь является создание качественных джозефсоновских ВТСП-переходов с воспроизводимыми свойствами и трансформаторов потока из ВТСП-материалов. Имеются первые успехи с использованием метода послойного атомного осаждения.

### *Устройства на основе ВТСП-сквидов*

На основе ПТ- и ВЧ-сквидов реализован целый ряд приборов.

1. В Лаборатории СП-сенсоров Университета Нагойи (Япония) создана 16-канальная кардиологическая камера на основе ВТСП-сквидов для измерения карты магнитных полей сердца. Камера работает при температуре жидкого азота и отличается простотой и дешевизной.

2. Сотрудниками ИРЭ (Москва) совместно с нидерландскими учеными создан усилитель на основе сквида на частоты  $\geq 1 \text{ ГГц}$ . Усилитель применяется для

работы совместно с СП-приемником на основе СИС смесителя и джозефсоновскими переходами в качестве генератора.

3. Система для геофизической разведки создается фирмой Conductus (США) по заказу ВМФ на основе нового поколения сверхчувствительных ВТСП-сквидов (сенсоров). Проект рассчитан на два года. Основные цели: создание портативного магнитометра на ВТСП-сквидах, работающего при температурах жидкого азота, для дистанционной локации магнитных (ферромагнитных) объектов под водой в морях и океанах (и для военных целей); поиск минералов (отложений) и зарытых (в землю), затопленных объектов.

4. Акселерометр и позиционный детектор на базе Nb—NbO<sub>x</sub> — PbInAu-сквида. Реализовано энергетическое разрешение  $3 \cdot 10^{-31}$  Дж/Гц и уровень шума по магнитному потоку  $2 \cdot 10^{-6}$  Ф<sub>0</sub>/√Гц. Это дает позиционное разрешение  $2 \cdot 10^{-14}$  м/√Гц (Университет Иены, Германия).

5. Усилитель для системы изображения магнитного резонанса, ВТСП-градиометры и другие приборы.

6. Приборы для медицины (например, кардиологический сканер, работающий без магнитной комнаты); шумовые термометры.

7. Сквиды для бесконтактного контроля ответственных конструкций, например, нефтяных скважин, мостов, самолетов. Принцип действия основан на измерении крайне малых магнитных полей, возникающих в напряженном металле.

### *Детекторы миллиметровых и субмиллиметровых волн*

Electric Communication Technology Council (Япония) прогнозирует резкое (в четыре раза) увеличение использования аппаратуры в 2010 г. по сравнению с текущим годом, при этом использование СП-устройств будет идти опережающими темпами. Приоритет будет отдаваться:

- одно- и двумерным матрицам СП-детекторов для радаров миллиметровых волн (системы воздушного и наземного базирования);
- базовым станциям для портативных персональных телефонов, работающих в миллиметровом диапазоне и использующих СП-фильтры;
- высокочувствительным детекторам миллиметровых волн с СП-смесителями для измерения деталей ландшафта (ВТСП перспективны благодаря возможности работать на таких частотах).

Установлено, что ВТСП-смесители на основе YBaCuO работают в широкой полосе — до частот 760 ГГц, поэтому ВТСП-детекторы и смесители весьма перспективны для использования в миллиметровом- и субмиллиметровом диапазонах.

### *Приемники*

Сотрудниками ИРЭ (Москва) совместно с нидерландскими коллегами из SRON (Гронинген) впервые создан сверхпроводящий интегральный приемник, работающий на частотах до 455 ГГц. Приемник состоит из двойной дипольной антенны, СИС-смесителя и СП локального генератора (полоса 200 кГц). В качестве локального генератора применен генератор, основанный на вязком течении магнитных вихрей в длинном джозефсоновском туннельном переходе Nb—AlO<sub>x</sub>—Nb [4]. Приемник изготовлен на подложке из SiO<sub>2</sub> 4x4 мм<sup>2</sup> в одном технологическом цикле.

### *Сверхпроводниковые детекторы и смесители*

Основаны на СИС (сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник) и СИН (сверхпроводник — изолятор — нормальный металл)-переходах. Находят при-

менение в радиоастрономии. Используются в миллиметровом, субмиллиметровом и ИК-диапазонах. Могут применяться как фотонные детекторы. Микромосты из нормальных металлов с СИН-переходом могут служить прямым детектором рентгеновского излучения. СП микромосты — интересные кандидаты для болометрических смесителей в терагерцовом частотном диапазоне.

*СИС-детектор.* Разработан для астрономического радиометра источников с непрерывным спектром (субмиллиметровый диапазон). Детекторы на основе Pb/Bi- и Nb-переходов на частоте 70 ГГц имеют уровень шума  $10^{-15}$  Вт (расчетный предел  $2 \cdot 10^{-16}$  Вт). По сравнению с полупроводниковыми приемниками с примерно таким же уровнем шума СИС-детекторы работают при более высоких температурах, с большей скоростью и имеют преимущества тонкопленочной технологии (для использования в матричных приемниках). СИС-детектор на основе Nb работает до частот 700 ГГц.

*СИС-детекторы для рентгеновских и оптических фотонов.* Лучшие образцы имеют энергетическое разрешение 14 эВ для фотонов с энергией 1 кэВ. Разрешение ухудшается в два—четыре раза для энергии 6 кэВ (переходы Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ag). Для оптической области спектра созданы детекторы отдельных фотонов ( $\lambda = 470$  нм, Nb—Al—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—Al—Nb-переход).

*Микроболометр на горячих электронах на основе Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu-перехода.* При работе на  $T = 100$  мК достигнут уровень шума  $3 \cdot 10^{-18}$  Вт, что в 10 раз ниже уровня шума лучших известных детекторов.

*СИС-смесители и другие типы смесителей.* На основе Nb в области частот 100—350 ГГц практически достигнут предел квантового шума. Для увеличения области рабочих частот до терагерцового диапазона разработаны СИС-смесители на основе NbN. Перспективны ВТСП-смесители. Ведутся разработки СИН-смесителей: из-за отсутствия джозефсоновских токов они имеют некоторые преимущества в ряде приложений. Разработаны и другие типы смесителей, например, смеситель на основе болометра с горячими электронами.

## Резонаторы

Созданные из ВТСП-материалов резонаторы различных типов (микрополосковые, на компланарных волноводах, спиральные, объемные и др.) продемонстрировали существенное повышение своих рабочих характеристик по сравнению с традиционными (резистивными). Получено значительное снижение шумового сигнала (на два порядка и более), сжатие полосы пропускания (на порядок), возрастание добротности на два-три порядка по сравнению с резонаторами аналогичной топологии, изготовленных из металлов (меди, золота и др.). Резонаторы работают в мега- и гигагерцовых диапазонах. На сравнительно низких частотах (десятки мегагерц) габаритные размеры ВТСП-резонаторов намного меньше традиционных.

Разрабатываемые ВТСП-резонаторы с прецизионной избирательностью имеют весьма перспективные области применения в радиосвязи, астрономии, медицине и военной технике.

*Диэлектрические резонаторы с ВТСП экранирующими пленками* применяются для генераторов и фильтров. Резонаторы на базе LaAlO<sub>3</sub> с пленками YBaCuO на частотах 5—10 ГГц показывают добротность до  $10^6$  при  $T \leq 40$  К. Ограничения обусловлены диэлектрическими потерями в LaAlO<sub>3</sub>. Резонаторы созданы в Исследовательском центре Юлиха (Германия). Аналогичные результаты достигнуты на сапфировых резонаторах с ВТСП-пленками, однако они больше по размерам

из-за низкой диэлектрической проницаемости. Для использования на спутниках необходима миниатюризация.

### *Генераторы с очень низким уровнем фазового шума для радаров*

Эта область — одно из перспективных направлений использования ВТСП. Комбинация сапфира и ВТСП-пленок является резонатором с наилучшими параметрами с точки зрения уровня фазового шума. Использование таких резонаторов в радарной системе удваивает радиус действия радара в результате улучшения доплеровского контраста.

### *Пассивные сверхпроводящие СВЧ-устройства*

Наиболее продвинуты разработки СП-фильтров, линий задержки, СП-антенн. Очень активно ведется создание СП СВЧ-приборов и подсистем для целей беспроводной коммуникации фирмами Японии, США, Франции, Нидерландов. Развиваются системы как для локальных, так и глобальных сетей, а также персональные телефонные системы. Линии задержки предназначены, главным образом, для военных радарных приложений, а также для оптической связи. Линии задержки, работающие в качестве пропускающих линий, важны для цифровых систем, которые используются в сверхскоростных переключателях для обработки информационных сигналов. Небольшие СП-антенны совместно с СП-генераторами позволяют достичь высокой радиационной эффективности при малых размерах.

Российские ученые Электротехнического университета (С.-Петербург) разрабатывают ВТСП фазовращатель на частоты до 10 ГГц.

Ведутся также работы над ВТСП-волноводами (эквивалент пропускающих линий на несколько меньшие частоты).

### *Сверхпроводящие фильтры*

Достигнуты значительные успехи в разработке многорезонаторных, режекторных и полосовых ВТСП-фильтров. Эти фильтры имеют значительно меньшие потери мощности в полосе пропускания, резкую форму АЧХ на полосе поглощения, меньшие (в 10—100 раз) габаритные размеры. Подобные ВТСП-фильтры можно ставить непосредственно на приемном тракте СВЧ-систем, работающих при температуре жидкого азота. Фильтры защищают военные ЛА и спутники от внешних мощных электромагнитных сигналов, которые могли бы повредить бортовые компьютеры.

Фирма Conductus (США) продемонстрировала образец уникального 19-полюсного СВЧ-фильтра, изготовленного на основе сверхпроводящей пленки, осажденной МОСVD-методом. Такой фильтр подавляет нежелательные сигналы в шесть раз эффективнее, чем лучшие из существующих фильтров. Обычные фильтры не могут иметь такое количество полюсов из-за слишком больших потерь полезного сигнала. Кроме того, сверхпроводящий фильтр значительно меньше по размерам.

Весьма актуально и перспективно создание банков фильтров (более чем с сотней полюсов), а также "низкочастотных" (до 2 ГГц) фильтров с очень высокой селективностью.

Актуальной и перспективной задачей является создание СП двумерных (2Д) цепей вместо трехмерных объемных резонаторов. Это связано с тем, что добротность СП 2Д резонаторов достигает значений добротности объемных или диэлектрических резонаторов (типично  $10^4$  на 5 ГГц). Созданный в настоящее время 6-полюсный фильтр на Х-полосу на основе микрополоска

$\text{YBaCuO/LaAlO}_3$  имеет объем  $450 \text{ мм}^3$  вместо  $33\,000 \text{ мм}^3$  (объем фильтра с объемным резонатором с теми же характеристиками). Этот тип фильтров может быть сформирован в виде очень компактного устройства с объемом  $50 \text{ см}^3$  вместо  $7000 \text{ см}^3$  для 50-канального банка фильтров в этой области частот. Использование фильтров на основе ВТСП  $\text{YBaCuO}$  интересно и выгодно для коммуникационных спутников даже с учетом криогенного рефрижератора объемом  $10\,000 \text{ см}^3$  и его системы питания. Кроме того, изготовление двумерных систем легче и может быть сделано с более высокой точностью, чем изготовление объемных резонаторов.

Гибридный (диэлектрик + ВТСП) фильтр имеет очень низкие потери — менее  $0,1 \text{ дБ}$  на  $12 \text{ ГГц}$ , узкую полосу  $0,3 \%$  и хорошую частотную стабильность при изменении температуры.

### *Линии задержки*

Созданы на основе  $\text{YBCO}$ -пленок на подложках  $\text{LiNbO}_3$  в Техаском Центре сверхпроводимости (США) с малыми потерями. Важным и перспективным для применений СП является создание линий задержки, включающих обработку сигнала. Линии задержки являются фундаментальным элементом различных ВТСП-приборов и подсистем. Они используются для ряда военных применений.

Линии задержки на ВТСП имеют более высокие рабочие частоты и широкую полосу пропускания по сравнению с традиционными (например, на коаксиальных линиях). При меньших габаритных размерах и массе они обеспечивают меньшие потери и дисперсию. Область применения ВТСП-линий задержки — векторные модуляторы (в монолитных фазовращателях для управления поляризацией излучения монолитных передатчиков антенной решетки).

### *Антенны*

Весьма перспективным направлением является разработка дипольных антенн на основе ВТСП. Можно увеличить в  $10$ — $100$  раз коэффициент усиления антенны, работающей при температуре жидкого азота. Хотя использование ВТСП в антеннах, размеры которых малы по сравнению с длиной волны излучения, не позволяет получать очень большие коэффициенты усиления, но за счет улучшения характеристик схем настройки и согласования антенны значительно расширяется диапазон их использования [5, 6]. Например, фирмы “Сименс” и “Интератом” разработали ВТСП-антенну СВЧ-диапазона, размеры которой (при идентичных рабочих характеристиках) почти в  $100$  раз меньше размеров антенны, выполненной на традиционных материалах, причем ее КПД повысился до  $95 \%$  по сравнению с  $5 \%$  для традиционной.

### *Транзисторы*

Фирма “Sandia” (США) разработала сверхпроводниковый транзистор с управляемым магнитным потоком (SFFT). На его базе созданы широкополосные усилители, смесители и фазовращатели гигагерцового диапазона с высокими рабочими характеристиками.

### *Токовые переключатели на ВТСП*

Переход СП в нормальное состояние происходит в узком температурном интервале вблизи температуры сверхпроводящего перехода. Этот переход может индуцироваться электромагнитным излучением, проходящим током, магнитным полем. Время перехода в нормальное состояние тонких ВТСП-пленок может

быть очень малым, что возможно использовать для создания скоростных бесконтактных переключателей тока, для входной защиты РЛС, для нелинейных шумоподавителей в скоростных ЭВМ. Предельное время переключения токовых переключателей достигает  $10^{-12}$  с.

### *СВЧ пассивные приборы для телекоммуникаций*

Эксперты "NTT Interdisciplinary Research Lab" (Япония) предсказывают значительное увеличение в будущем мобильных телекоммуникационных систем беспроводной связи. Это и локальные сети, спутниковые системы, радиовещание на миллиметровых волнах и т. д. СП (включая ВТСП)-элементы активно внедряются в различные системы телекоммуникаций.

Примеры:

1. СП-резонаторы как базовый элемент генераторов и фильтров. В настоящее время максимальная добротность  $Q$  достигнута на сапфировом диэлектрике, покрытом ВТСП-пленкой Т1-системы. На таком резонаторе получена величина  $Q > 2 \cdot 10^6$  на частоте 5,6 ГГц при  $T \leq 80$  К. На полосковых СП-резонаторах достигнуты  $Q \sim 5 \cdot 10^5$  (на частоте 4,4 ГГц), что более чем в 100 раз превосходит добротность аналогичного резонатора из несверхпроводящих материалов.

2. СП-фильтры различного типа для телекоммуникационных приложений. В ряде лабораторий потери составили менее 1 дБ и получена ширина полосы 1 %. Гибридный (СП + диэлектрик) фильтр позволяет достичь потерь менее 0,1 дБ и ширины полосы менее 0,3 %; он весьма перспективен как пропускающий узкополосный фильтр коммуникационных линий.

3. СП-линии задержки являются базой многих СП-приборов. В США и Японии развиты СП-линии задержки длиной 1 м для применения в радарх. Двухдюймовая линия показывает время задержки около 44 нс и потери около 0,4 дБ/нс ( $T = 77$  К, частота 6 ГГц). В Японии создана относительно короткая, широкополосная СП-линия задержки для использования в модуляторах и демодуляторах в оптических коммуникационных системах. Из-за малых потерь линия имеет преимущество над обычными линиями задержки до частот в несколько сот гигагерц.

4. СП-антенны различного типа. Имеют высокую эффективность при малых размерах. Очень высокая направленность излучения реализуется при использовании системы таких антенн. Из-за почти нулевого сопротивления радиационная эффективность СП-антенны достигает практически 100 %. Разработано несколько типов сверхнаправленных СП-антенных систем.

5. Гибридные системы, включающие СП СВЧ пассивные устройства и полупроводниковые приборы, были развиты в последние годы для спутниковых коммуникационных сетей. В рамках ВТСП космического эксперимента Исследовательской лабораторией ВМС США развиты СП-конвертер вниз с шириной полосы 36 ГГц, СП локальный генератор с шириной полосы 4,7 ГГц и мгновенный СП-детектор частоты. Разрабатываются более совершенные подсистемы и системы охлаждения.

Гибридные (СП/полупроводниковые) приборы, использующие широкополосность СП СВЧ-приборов, начинают применяться также в высокоскоростной оптической модуляции и демодуляции в системах волоконной оптики.

Схематически изобразить поле СП СВЧ-приборов можно в виде, представленном на рис. 2.

Преимущества гибридных систем позволяют ожидать, что СП-приборы станут ключевой технологией в информационных и телекоммуникационных системах 21 века.

## Высокоскоростные СП-устройства для коммуникационных систем

В ряде организаций Японии проводятся работы по использованию ВТСП в различных областях коммуникационных систем.

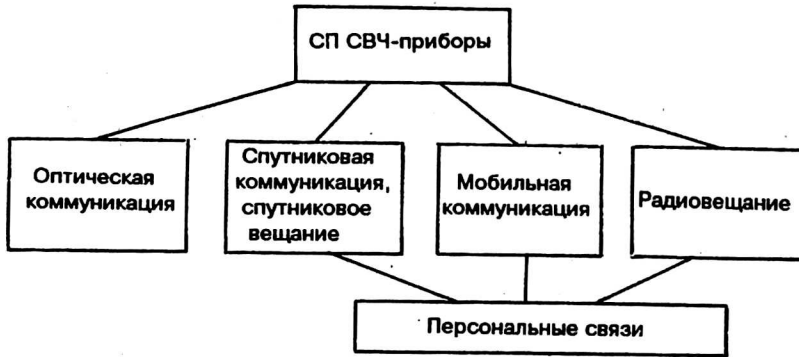


Рис. 2. Области применения СП СВЧ-приборов

1. Телевизионное вещание, мобильные телефоны. Частоты 0,3—3 ГГц. Ведутся разработки по использованию СП-антенн малого размера и узкозонных фильтров для станций мобильных телефонов.

2. Использование СП СВЧ-устройств в технике. Частоты 2,5—5,8 ГГц. Разрабатываются ВТСП-антенны и питающие линии для передачи энергии от больших солнечных батарей спутников.

3. Спутниковое радиовещание, спутниковая связь. Частоты 12 и 21—23 ГГц. Разрабатываются направленные (с изменением направления) приемные антенны для мобильных систем коммуникаций, спутниковые силовые линии и приемные устройства.

4. Специальное вещание и связь, секретная коротковолновая связь (частоты 30—60 ГГц). Ведется разработка СП спутниковых силовых линий, приемных цепей, автомобильных радаров, специальных компактных антенн.

5. Кислородные и озоновые СП-сенсоры (частоты от 60 до 650 ГГц).

6. Террагерцовые ВТСП-фильтры для оптической связи с частотами более 1000 ГГц.

## Цифровые устройства и ЭВМ

**Высокоскоростная обработка сигналов.** Преимущества СП в скоростной обработке сигналов:

- в приборах с быстрым переключением могут использоваться джозефсоновские переходы с низким входным импедансом;
- электрические сигналы могут передаваться без потерь и дисперсии со скоростями, близкими к скорости света.

Джозефсоновские элементы с характерным напряжением 1 мВ имеют время переключения 2 пс, что соответствует частотам переключения 500 ГГц.

В настоящее время развивается так называемая RSFQ логика (быстрые одно-квантовые цепи); предложенная К. К. Лихаревым в 1991 г. При этом передаваемые импульсы напряжения эквивалентны передаче одного кванта магнитного потока. Таким образом достигаются минимальное энерговыделение на операцию и максимальная скорость передачи сигнала. Частоты переключения в таких системах на порядок превосходят частоты, которые можно достичь в полупроводниковых системах.

*Компьютеры и ЭВМ.* Наиболее продвинуты разработки СП-микропроцессоров японских фирм (Hitachi, NEC, Fujitsu) и ряда лабораторий. Созданы прототипы цифровых процессоров на основе ниобиевых джозефсоновских переходов. Например, в Электротехнической лаборатории создан 4-килобитовый прототип джозефсоновского компьютера с временем переключения 500 пс на чипе  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ .

*Межсоединения.* Скорость и быстродействие современных ЭВМ определяются временем задержки сигнала на элементах микросхемы (вентиллях), а также их соединениях, причем задержка на межсоединениях обычно составляет половину общего времени задержки высокопроизводительных вычислительных машин.

Особенно актуальна проблема снижения времени задержки сигнала на межсоединениях для будущих быстродействующих компьютеров с временем цикла менее 1 нс, работающих с гигагерцовыми тактовыми частотами, когда становятся существенными общие размеры компьютера, определяющие минимальную длину межсоединения. Применение СП в быстродействующих СБИС дает возможность решить многие проблемы токовой разводки. Большие перспективы открывает применение ВТСП-межсоединений в многокристальных модулях: заметно повышается плотность упаковки, расширяется частотный диапазон ИС, снижается энерговыделение.

#### СОЗДАНИЕ НОВЫХ ВТСП-СТРУКТУР И ИСКУССТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Опубликовано большое число работ по созданию, оптимизации свойств ВТСП-пленок, пленочных структур, джозефсоновских переходов, слабых связей других типов из ВТСП.

В последние годы была развита техника послойного (атомного) осаждения ВТСП-соединений. Этим методом на атомном уровне можно получать различные гетероструктуры, состоящие из сверхтонких слоев различных ВТСП. Таким методом получены идеальные джозефсоновские переходы на основе  $\text{YBaCuO}/\text{PrBaCuO}/\text{YBaCuO}$ , сверхрешетки, новые соединения гомологического ряда  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_x$  с  $n$  до 10, новые "искусственные" материалы, состоящие из ВТСП-слоев разных классов. По- существу, развивается новое направление "атомной" инженерии ВТСП.

Разработано более 10 различных типов конфигураций ВТСП слабых связей (джозефсоновских переходов).

Наиболее актуальные проблемы сверхпроводниковой электроники:

- системная интеграция элементов;
- компактизация криогенных и СВЧ-элементов;
- разработка специальных систем охлаждения для вибрационно чувствительных приборов типа высокочастотных резонаторов;
- понижение стоимости рефрижераторов и увеличение их доступности.

#### ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В МИРЕ

Бесспорными лидерами в исследованиях и разработках по сверхпроводимости являются США и Япония. Япония значительно опережает США в создании СП цифровых электронных приборов и систем. Ей удалось достичь высокого уровня разработки ниобиевой технологии и первой решить проблему долговременной стабильности свойств металлов с низкими температурами плавления. Фирмы Японии делают акцент на технологии обработки СП-материалов, что является ключевым вопросом для всех областей применения СП. Япония лидирует в производстве СП-проводов и разработке транспортных средств на основе СП. США благодаря огромной стимуляции принадлежит бесспорное лидерство в

разработке СП-приборов и систем для военных применений и медицины. США пока сохраняют лидерство и в тонких ВТСП-пленках, микроволновых СП-приборах и системах. Япония быстро догоняет США по технологиям СП для коммерческой связи, генерации, передачи и накопления энергии. Великобритания и ФРГ вырвались вперед в производстве СМ для медицинской аппаратуры формирования изображений. Этому способствовало строительство ускорителя на встречных пучках в Церне.

По мнению зарубежных экспертов, для России характерно общее отставание по фундаментальным исследованиям, синтезу новых высокотемпературных СП, существенное отставание по всем важнейшим направлениям разработки СП-интегральных схем и совмещению технологии СП с полупроводниковой технологией. Уровень развития технологий получения и обработки СП и применения их в энергетических устройствах оценивается как средний.

### З а к л ю ч е н и е

Первые практические применения СП были примерно 30 лет назад. В настоящее время NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn провoda составляют основу существующего рынка ЯМР-спектрометров, устройств магнитного резонансного отображения и крупномасштабных проектов по физике элементарных частиц и термояда. ВТСП могли бы постепенно внедряться в эти области при улучшении их свойств. Только начинается развитие реальных проектов передающих кабелей, трансформаторов, ограничителей тока и даже электромоторов. Здесь НТСП- и ВТСП-системы в будущем могут иметь очень большой рынок. Сильноточным ВТСП-устройствам предстоит еще очень длительный путь развития, прежде чем они смогут занять достойное место на СП рынке, но первые практические разработки ВТСП-устройств вселяют чувство надежды на будущий успех.

Весьма заметны успехи в разработке сверхпроводниковой микроэлектроники: сверхчувствительных детекторов магнитного поля (СКВИДов), пассивных и активных СВЧ-элементов, аналоговых и цифровых устройств, в том числе военного назначения, особенно для систем связи, наблюдения и обработки информации.

Крайне перспективной областью практического использования СП является мобильная связь и, в первую очередь, сотовая телефонная связь.

Будущие применения сильно зависят от инвестиций в исследования по сверхпроводимости и развития других областей науки и техники. Предполагается создание дешевых и надежных рефрижераторных систем широкого диапазона. Достигнутый прогресс в открытии новых СП и создании на их основе уникальных устройств и приборов подтверждает яркое будущее прикладной сверхпроводимости и оправдывает мировую общественную поддержку этой области, но она нужна постоянно. Финансирование программ по сверхпроводимости в России примерно на два порядка отстает от стандартов США, Японии и даже ведущих европейских стран. Это, конечно, необходимо пересмотреть, если Россия не хочет полностью утратить свои достаточно скромные достижения в развитии сверхпроводимости и сохранить свое положение на мировом рынке товаров, использующих СП-технологии.

В данном обзоре использованы также результаты работ, представленных на конференциях по прикладной сверхпроводимости в 1993—1995 гг., и обзорного плана [8—20].

### Л и т е р а т у р а

1. Levovic M. et al. Supercond//Sci. Technol. 1996. V. 9, № 3. P. 201.
2. Бойков И. С., Головошкин А. И.//Прикладная физика. 1994, № 1. С. 4.
3. Бойков И. С., Головошкин А. И.// Там же, № 2. С. 3.

4. Research Highlights 1993—1994.
5. ISTE Journal, 1994.
6. Applied Superconductivity 1995. Inst. Phys. Conf. Series № 148. Bristol and Philadelphia.
7. Hornfeld S., et al. 1994. ABB-Technik 1/94. P. 13.
8. Proc. of the Int. Workshop on Supercond. 1995. Maui, Hawaii, USA.
9. Pros. AHMF'95, Feb. 1995. Isukuda, Japan.
10. Jungst K. P. et al. 1995. Use of Superconductivity in Energy Storage. World Scientific Publ., Singapore.
11. Proc. of the 7th Int. Workshop on Critical Current in Superconductors. 1994. World Scientific Publ.
12. 1995 Workshop on ac losses. San Francisco, USA.
13. Pros. ASC'94, Oct. 1994, Boston, USA.
14. ITER EDA, Technical Review presented by Joint Central Team and Home Teams, NAKA, May 1995.
15. Nakashima H.. 1994. IEEE Trans. On Magnetics, 4, 1572.
16. Proc. MT-14, June 1995, Tampere, Finland.
17. Wilson M. Superconducting Magnets. Oxford Univ. Press. 1970.
18. Proc. of the 8th CINTEC World Ceramic Congress and Forum on New Mater. Florence, Italy, 1994.
19. Proc. of the 4th World Conf. On Supercond., Orlando Fl., USA.
20. Зимняя школа по прикладной сверхпроводимости. Февраль 1996. — Протвино, Россия.

## PROBLEMS AND APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTING TECHNOLOGIES

*I. S. Baikov*

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

*A. I. Golovashkin*

P. N. Lebedev Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

*V. S. Kruglov*

RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*A. I. Baikov*

General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

*This review is our view of the current state and the future evolution of applied superconductivity. It is approached by giving some examples from the history of applied superconductivity and by sketching the present market for products using superconducting components. Today's superconducting NMR (Nuclear Magnetic Resonance), MRI (Magnetic Resonant Imaging) and SQUID systems and the scale projects of the near future, especially in the field of particle accelerators and energy technology, are exclusively based on metallic superconductors. The High Temperature Superconductors (HTSC) still have a long way to go before they will have a noticeable impact on the superconductivity market, but quite a few practical uses of high  $T_c$  components are beginning to take shape. HTSC bulk materials in the form of current leads are the first products which are used in commercial systems. The fabrication and application of superconducting Josephson junctions is progressing and may find uses in the fields of biomedical research and non destructive evaluation. HTSC wires and tapes are being tested in cryogen free or very high field magnets and in energy technology. One particular application area which is carrying much hope for the introduction of HTSC materials to present technology is the practical use of superconductors in high frequency fields. Epitaxial HTSC films are expected to have their first wide spread use in mobile communication and rf signal sensing. An update forecast of the future superconductivity world market is given.*