

ОБ ИННОВАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВООРУЖЕНИЯ



Юрий Михайлович Михайлов

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА
ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМИССИИ ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМИССИИ
ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

Одной из основных задач Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации является координация деятельности федеральных органов исполнительной власти в области развития оборонно-промышленного комплекса, науки и технологий в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства.

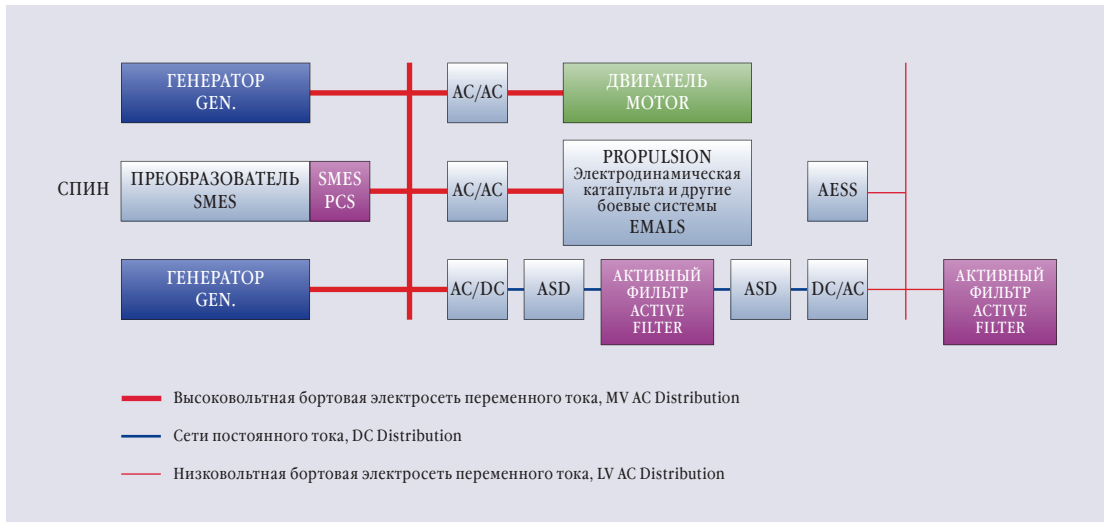
Решение указанной задачи находит свое отражение в реализации военно-технической политики и политики Российской Федерации в области развития оборонно-промышленного комплекса. Разработка рекомендаций по указанным направлениям деятельности Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации – одна из важнейших функций ее научно-технического совета.

Значимым фактором совершенствования системы вооружения Российской Федерации является изыскание и инновационное внедрение прорывных направлений, опирающихся на результаты фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых в стране.

Результаты рассмотрения в научно-техническом совете Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации материалов, представленных научно-исследовательскими институтами оборонно-промышленного комплекса и Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», учреждениями Российской академии наук и высшей школы, показывают, что одним из перспективных инновационных направлений производства высокотехнологичной конкурентоспособной продукции военного, гражданского и двойного назначения является использование технологий сверхпроводимости.

Эффект сверхпроводимости, связанный с исчезновением электрического сопротивления материала при конечной температуре, отличной от абсолютного нуля, был открыт в 1911 году.

1



КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
 СВЕРХПРОВОДИМОСТИ НА КОРАБЛЯХ ВМС США

Применение сверхпроводников позволяет радикально снизить энергозатраты на создание сильных магнитных полей и повысить плотность тока в обмотках электрических машин различного назначения, что в разы уменьшает их габариты и массу по сравнению с традиционными аналогами.

Практическое использование эффекта сверхпроводимости было связано с открытием в 60-х годах прошлого века низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). Рабочая температура таких материалов на основе сплава NbTi и интерметаллического соединения Nb₃Sn составляет 4,2 К и достигается при охлаждении материала жидким гелием. Производством в промышленных масштабах НТСП-проводов на основе указанных материалов занимаются более 10 специализированных фирм и отделений крупных компаний в Германии, Франции, Италии, Японии и США.

Свойства НТСП были использованы у нас в стране при создании магнитных систем ускорителей заряженных частиц, установок термоядерного синтеза, различного оборудования для энергосистем, а также в медицинской технике. Однако дороговизна жидкого гелия и сложность криогенных систем сдерживали широкое внедрение указанных технических средств.

Ситуация кардинально изменилась после открытия в 1987 году высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые могут применяться при рабочей температуре около 20 К, достигаемой при использовании для охлаждения материала газообразного гелия, либо при рабочей температуре около 77 К при использовании для этих целей жидкого азота. При этом стоимость криогенных систем существенно снижается. В настоящее время развиваются две различные технологии производства высокотемпературных сверхпроводников:

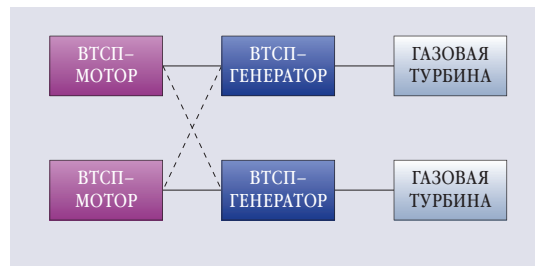
- ВТСП-проводники первого поколения – композиционные ленточные проводники (или листы) в серебряной оболочке на основе керамики соединения $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ – Bi-2223/Ag;

- ВТСП-проводники второго поколения – металлические ленты с нанесенным на них слоем ВТСП-соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ – Y-123 (или R-123, где R – редкоземельный элемент).

ВТСП-проводники обоих типов имеют свои преимущества и недостатки. Проводники первого поколения более технологичны, но для их изготовления требуется серебро, что сказывается на их цене. Кроме того, эти проводники недостаточно устойчивы в магнитных полях. Проводники второго поколения более устойчивы, однако их производство требует дорогостоящих реактивов и оборудования.

Промежуточное положение между НТСП и ВТСП занимает диборид магния, открытый в 2001 году. Применение этого соединения возможно при рабочей температуре 20–27 К, при этом оно выгодным образом отличается от ВТСП более низкой стоимостью. Относительно

2



КОНЦЕПЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА (КРИОПЛАНА)

простая технология и дешевизна исходных материалов позволили ряду стран наладить производство проводников на основе диборида магния.

Открытие ВТСП и диборида магния привело к существенному росту рынка транспортного, энергетического и электронного оборудования, при создании которого используется эффект сверхпроводимости. По данным иностранных источников, в 2010 году объемы продаж всех видов такого оборудования могут достигнуть 5 млрд. долларов, а к 2020 году – 38 млрд. При этом более половины рынка будет занимать продукция, ориентированная на использование в энергетике и электронике, в том числе военного назначения.

Преимущества использования сверхпроводников при создании вооружения, военной и специальной техники могут быть проиллюстрированы направлениями работ, выполняемых в этой области в ведущих иностранных государствах.

1. Перспективными областями применения преимуществ технологий сверхпроводимости могут стать системы электродвижения вооружения, военной и специальной техники. Это обусловлено тем, что СП-двигатели отличаются высокой компактностью при массе в два-три раза меньшей, чем у традиционных аналогов, и значительно более низкими уровнями вибраций и шумов. В связи с практическим отсутствием омических потерь в сверхпроводниках коэффициент полезного действия (КПД) СП-двигателей выше, чем у традиционных двигателей, даже с учетом расхода энергии, связанного с криогенным обеспечением их работы.

1.1. СП-технологии, применяемые для создания систем электродвижения подводных и надводных кораблей, отличаются не только экономичностью, малой шумностью, но и меньшими габаритами и массой конструкций. Например, судовой СП-двигатель мощностью 36,5 МВт, испытанный в 2007 году в США, имеет КПД более 97% (для обычного двигателя этот показатель равен 85–87%), весит 69 тонн при габаритах 3,4 × 4,6 × 4,1 м (традиционный «медный» двигатель с теми же параметрами имел бы массу не менее 200 тонн и вдвое большие размеры).

Кроме того, использование двигателей, реализованных на основе технологий сверхпроводимости, обеспечивает большую свободу конструирования силовой установки и корабля в целом:

- дизели (турбины), работающие на СП-генераторы, могут быть размещены внутри корабля без жесткой привязки к оси гребного вала;
- вынос гребных СП-двигателей в гондолы, размещаемые вне основного корпуса судна, позволяет улучшить гидродинамику корабля;
- использование поворотных гондол с СП-двигателями позволяет улучшить маневренность корабля, не прибегая к установке дополнительных подруливающих устройств.

Наиболее ощутимый эффект при создании кораблей принесет комплексное использование СП-оборудования. Одна из возможных концепций комплексного использования технологий сверхпроводимости при создании кораблей для ВМС США показана на рисунке 1.

1.2. Системы электродвижения для авиационной техники, использующие вращающиеся лопасти турбин СП-электродвигатели, могут обеспечить требуемое для самолета соотношение мощности, веса и габаритов двигателя. Одна из возможных концепций использования технологий сверхпроводимости при создании самолета показана на рисунке 2.

В качестве источника энергии для двигателей электрифицированного самолета предполагается использовать водородные топливные элементы. При этом необходимое охлаждение обмоток СП-электродвигателей будет осуществляться жидким водородом. Такой авиалайнер (криоплан) сочетает в себе ряд современных тенденций в авиастроении:

- использование в качестве топлива жидкого водорода;
- применение турбореактивного привода, совмещающего высокий КПД турбины с возможностью изменения в широких пределах скорости движения самолета;
- применение СП-генераторов и СП-двигателей, позволяющее достигать более высокой мощности, чем у газовых турбин;
- размещение СП-генераторов внутри фюзеляжа самолета, снижающее шумность самолета и его заметность в инфракрасном диапазоне длин волн.

Кроме того, криоплан отличается нулевой эмиссией парниковых газов и вредных веществ.

2. Одним из важнейших направлений защиты кораблей от магнитных мин является применение систем размагничивания их корпусов, требующих использования значительного количества электрических кабелей. По оценкам иностранных специалистов, один ВТСП-кабель диаметром 1,75 дюйма эквивалентен применению 14 аналогичных по сечению медных кабелей.

Использование в системах размагничивания корпусов кораблей вместо традиционных медных СП-кабелей позволит уменьшить: общую длину кабелей – более чем на 80%; массу кабелей – на 50–80%; энергопотребление – на 25%; стоимость – на 75%.

3. Продолжает оставаться исключительно актуальной проблема разминирования акваторий и земной поверхности. Необходимость использования эффекта сверхпроводимости при решении этой задачи было подтверждено созданием в СССР в 80-е годы прошлого столетия электромагнитных тралов для морского и наземного применений. Так, буксируемый вертолетом морской трал ВНТ-СП имел массу в восемь раз меньшую, чем его традиционный прототип (1,5 тонны вместо 12 тонн).

4. Технологии сверхпроводимости могут быть использованы при создании мощных энергосистем для вооружения, военной и специальной техники. Сверхпроводящие индуктивные накопители энергии (СПИН) могут применяться в качестве резервных источников бесперебойного питания командных пунктов различного уровня. Кроме того, совместное использование СПИН и дизельной электростанции небольшой мощности может позволить исключить необходимость подвода линий электропередач, обеспечивающих работу радиолокационных систем и узлов связи на удаленных объектах, при приемлемых расходах дизельного топлива.

Повышение надежности и качества систем электроснабжения вооружения, военной и специальной техники может обеспечиваться и за счет использования кинетических накопителей энергии (КНЭ) на основе объемных ВТСП. К настоящему времени имеется возможность создания таких накопителей энергии энергоемкостью от 1 до 20 МДж и сроком службы от 15 до 20 лет. Наряду с использованием КНЭ для ВВСТ морского и наземного базирования рассматривается возможность использования КНЭ для управления положением космических аппаратов.

5. Нелетальное оружие, предназначенное для нанесения теплового поражения кожным покровам живой силы противника, может быть построено на гиротронах. Эти генераторы мощного СВЧ-излучения работают в диапазоне около 110 ГГц и основаны на принципе электронно-циклотронного резонанса в магнитном поле сверхпроводящего соленоида.

Использование сверхпроводников позволяет создавать системы вооружения, обеспечивающие нелетальное поражение личного состава на расстоянии нескольких сотен метров от источника излучения.

6. Важна роль технологий сверхпроводимости при создании вычислительной техники. В этом случае важную роль играет возможность получения при больших объемных плотностях монтажа очень малых времен переключения и ничтожных потерь мощности. Эта проблема может быть разрешена за счет использования ВТСП-пленок. В настоящее время разрабатываются опытные образцы тонкопленочных джозефсоновских контактов – контактов, которые образованы двумя сверхпроводниками, разделенными тонким слоем диэлектрика (~1 нм) или металла, в схемах, содержащих сотни логических элементов памяти. Микропроцессоры на

сверхпроводниках способны работать при тактовой частоте в тысячу раз большей, чем в традиционных полупроводниковых изделиях (террагерцовый диапазон) при практически нулевом потреблении энергии. При этом следует отметить, что до настоящего времени не решена проблема снижения габаритных размеров таких устройств.

7. Применение технологий сверхпроводимости играет значительную роль при создании электронной компонентной базы.

7.1. Компоненты СВЧ-диапазона.

Генераторные приборы. Применение ВТСП-материалов при создании ламп бегущей волны показал возможность увеличения генерируемой мощности в диапазоне длин волн от 3 см до 8 мм за счет использования магнитной фокусировки электронного потока, реализованной на основе ВТСП-обмоток, в 8–10 раз.

Пассивные элементы. Широкие перспективы применения сверхпроводников в пассивных компонентах СВЧ-диапазона длин волн (резонаторы, фильтры, линии задержки) объясняются возможностью получения тонких ВТСП-пленок на монокристаллических подложках. Параметр, непосредственно определяющий высокочастотные свойства ВТСП-пленок, – их поверхностное сопротивление. Благодаря тому что начальное значение поверхностного сопротивления (на постоянном токе) у ВТСП-пленок на несколько порядков ниже, чем у металлов, они сохраняют это преимущество до частот 100–200 ГГц.

Резонаторы. Замена металлов, омические потери в которых приводят к ослаблению и дисперсии полезного сигнала, на ВТСП-материалы значительно повышает рабочие характеристики резонаторов. Считается, что применение ВТСП-пленок в резонаторах позволит снизить коэффициент шума в 100 и более раз, а полосу пропускания сжать более чем в 10 раз. Кроме того, габариты ВТСП-резонаторов на сравнительно низких частотах (десятки МГц) намного меньше традиционных.

Фильтры. Для фильтров приемных устройств большое значение имеют малые габариты, а одно из основных требований к фильтрам передающих устройств – большая допустимая мощность. Достижение таких характеристик стало возможным за счет применения ВТСП-материалов. Например, сложный блок ВТСП-фильтров разработан и изготовлен в США. В его состав входят 32 фильтра и оптоэлектронный переключатель с временем переключения 10 нс. Указанный блок предназначен для военных применений и позволяет одновременно использовать приемник РЛС предупреждения и РЛС системы вооружения.

Линии задержки. Во многих СВЧ-устройствах необходима задержка распространения электромагнитного сигнала от нескольких пикосекунд до микросекунд при его минимальном ослаблении, в этой связи ВТСП-линии задержки предпочтительнее линий задержки, выполненных на основе традиционных металлов. Так, в отрезке линии сверхпроводника длиной 1 м ослабление может быть на три порядка ниже, чем в золотом проводнике той же длины с таким же поперечным сечением. При этом линии задержки на ВТСП-материалах обладают более высокими частотами и шириной полосы пропускания, чем традиционные (например, на коаксиальных линиях). Кроме того, при меньших размерах и массе ВТСП-линии задержки имеют меньшие потери и дисперсию сигнала.

7.2. Транзисторы.

При замене традиционных металлов в затворах полевых транзисторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн на ВТСП-материалы соответствующее уменьшение сопротивления затвора увеличивает частоту отсечки и снижает коэффициент шума. Примерами ВТСП-транзисторов может служить транзистор со сверхпроводниковой базой и полупроводниковой изоляцией, структура которого аналогична биполярному транзистору. Одно из достоинств этого прибора – малое сопротивление базы – увеличивает его рабочую частоту до 100 ГГц.

На базе транзистора, разработанного в США и полностью выполненного на ВТСП-материале, получившего название «сверхпроводниковый транзистор с управляемым магнитным потоком», изготовлены СВЧ-усилители с коэффициентом усиления свыше 10 дБ на частоте 4 ГГц и шириной полосы пропускания более 1 ГГц.

7.3. Чувствительные электронные приборы.

Магнитометры. На основе явления квантования магнитного потока и использования уникальных свойств джозефсоновского контакта созданы высокочувствительные приборы, которые могут фиксировать изменение потока от 10^{-4} до 10^{-19} Вб. С помощью таких магнитометров можно измерять магнитные поля интенсивностью до 10^{-14} Тл. Такие высокочувствительные приборы могут использоваться для нужд магнитной локации, в том числе для определения местоположения глубоководных подводных лодок.

ВТСП-боллометры. Резкое изменение сопротивления сверхпроводника при температуре перехода в сверхпроводящее состояние используется для создания болометров – приборов для регистрации ИК-излучения. Боллометрические приемные элементы излучения на основе ВТСП-пленок могут оказаться значительно более перспективными, чем традиционные полупроводниковые, особенно для решения задач создания ИК-каналов связи, работающих в условиях повышенной радиации и воздействий сильных электромагнитных полей.

Таким образом, одно лишь далеко не полное перечисление направлений возможного использования преимуществ технологий сверхпроводимости показывает перспективность применения сверхпроводников при создании вооружения, военной и специальной техники, оборудования гражданского и двойного назначения.

Целенаправленная организация работ по использованию эффекта сверхпроводимости в интересах инновационного развития техники позволит:

- существенно образом расширить боевые возможности и эксплуатационные характеристики нового поколения вооружения;
- поднять на должный научно-технический уровень характеристики отечественного транспортного, энергетического и электронного оборудования;
- более полно использовать имеющийся в России научно-технический и производственно-технологический задел, сконцентрированный в организациях оборонно-промышленного комплекса, в учреждениях Российской академии наук и высшей школы.

Список литературы:

1. Oberly C. Lightweight Superconducting Generators for Mobile Military Platforms, Proceeding of the PES Meeting, Montreal, Quebec, June 2006.
2. High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motors, American Superconductor. 2007.
3. Blanding D. Subsystems Design and Integration for the More Electric Aircraft. 2007.
4. Masson P., Soban D., Brown G., Luongo C. HTS Machines as Enabling Technology for All-Electric Airborne Vehicles. Superconductor Science and Technology. Vol. 20. 8. P. 748–756, August 2007.
5. Luongo C., Masson P., Nam T., Mavris D., Kim H., Brown G., Waters M., Hall D. Next Generation More Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductor. IEEE/CSC&ESAS European Superconductivity News Forum (ESNF), 6. October 2008.