

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 3 выпуск 2
апрель 2006

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы
Генераторы
Токоограничители

Инвесторы
Накопители

«Глобальная энергия» присудила приз 2006 года ITER'у

Премия «Глобальная энергия» 2006 года (призовой фонд в 1,1 млн. долл.) присуждена академику Евгению Велихову (Россия), доктору Масаджи Йошикава (Япония) и доктору Роберту Аймару (Франция) за "разработку научно-технических основ для создания международного термоядерного реактора (проект ИТЭР)".

После смерти Л.А.Арцимовича в 1973 году академик Велихов стал руководителем термоядерной программы СССР. По признанию многих специалистов, именно он сыграл одну из главных ролей в судьбе "термояда". Он первым сделал принципиальный вывод о том, что надо приступить к разработке термоядерного реактора на основе установки ТОКАМАК и сумел убедить в этом все международное сообщество. Благодаря ему наша страна имела и имеет приоритет в этом направлении, которое может в принципе решить энергетические проблемы землян. Идея магнитного удержания термоядерной плазмы в установках типа токамак принадлежит России - А.Д.Сахарову и И.Е.Тамму, ее развитие – Л.А.Арцимовичу, М.А.Леонтовичу и Б.Б.Кадомцеву.

Проблема энергетика – одна из самых актуальных в мире. Падение нефтедобычи начнется приблизительно к 2030 году, газа несколько позже. Эстафету "перехватит" атомная энергетика, потому что она сегодня существует, а дальше к ней "подключится" термоядерная энергетика. Сегодняшние атомные электростанции, основанные на делении атомного ядра (U^{235}) при цепной реакции, обеспечивают 14% мирового потребления электричества, но экологически не безопасны. Термоядерный синтез, как источник энергии, основан на реакции двух легких изотопов (обычно, дейтерия и трития) с образованием атома гелия и нейтрона. Изотопы в термоядерном реакторе выгорают, практически не оставляя радиоактивных отходов, а реакция идет в высокотемпературной плазме при температуре более 150 млн. градусов. При этом на единицу веса термоядерного топлива получается в ~10 млн. раз больше энергии, чем при сгорании органического топлива, и примерно в ~10 раз больше, чем при расщеплении ядер урана. Принципиальные фундаментальные вопросы, связанные с освоением энергии термоядерного синтеза, решены, чему способствовали, в частности, работы по проектам Токамак-7, Токамак-10, Токамак-15 (СССР), UWMAK-III, ARIES-I, TFTR (США), JET (Англия), международный проект ITER. Остается много нерешенных проблем на инженерном уровне. Огромную роль в их решении может сыграть создание термоядерного реактора по проекту ITER, к строительству которого на территории Франции приступил международный консорциум (Россия, ЕС, США, Япония, Китай, Индия, Ю.Корея). В 2007 году, по словам Велихова, можно будет приступить к размещению заказов на оборудование для будущего реактора, и через 8 лет можно будет получить первую термоядерную плазму. Планируемая мощность реактора ITER - 500 МВт при поддержании режима термоядерной плазмы в течение 400 секунд.

<http://www.ge-prize.ru/> ; <http://www.iter.org>

И далее...

Сколько готовы заплатить США за перспективную энергетическую идею? 2

РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

ВТСП 2-го поколения в России 2

Силовые ВТСП кабели во ВНИИКП 3

Комплекс сверхпроводникового оборудования 5

ВТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

AMSC полностью переходит на выпуск 2G 7

2G в Японии 8

Sumitomo упорно сохраняет 1G технологию 8

ВТСП УСТРОЙСТВА В ДЕЙСТВИИ

ВТСП трансформатор в энергетической сети Китая 9

Рост заказов на системы стабилизации напряжения компании AMSC 9

ИННОВАЦИИ И ПОЛИТИКА

Президент SuperPower о ВТСП электроэнергетике 10

ВТСП энергетическая программа Ю.Кореи 11

Сколько готовы заплатить США за перспективную энергетическую идею?

Может ли приз в 1 млрд. долл. положить конец зависимости США от зарубежной нефти? «Может!» - считает сенатор Frank Wolf, если частные компании смогут предоставить такую сумму в распоряжение Национального научного фонда (NSF), который затем передаст ее ученым, предложившим идею, как сделать США энергетически независимыми.

Science, 2006, 311, 1363

РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

На ежегодной научной конференции ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт» 13 апреля 2006 г. были заслушаны доклады в рамках секции «Техническая сверхпроводимость». Заседание открыл Н.А. Черноплеков и его вступительную фразу «Эра коммерческого применения ВТСП проводников началась!» можно поставить эпиграфом к ряду представленных на секции докладов, относящихся к применению сверхпроводников в электроэнергетике. Ниже мы представим тезисно содержание этих докладов.

ВТСП 2-го поколения в России

О ходе работ над созданием ВТСП лент 2-го поколения в России доложил профессор Химического факультета МГУ, д.х.н. А.Р.Кауль. В настоящее время работы финансируются в рамках Госконтракта ФАНИ 02.435.11.2001, ставящего следующие задачи:

- 1) разработать технологию биаксиально-текстурированных лент на основе Ni -сплавов;
- 2) создать лабораторную установку для нанесения буферных слоев и ВТСП-покрытий;
- 3) разработать $MOCVD$ -процесс непрерывного осаждения буферных слоев и ВТСП-покрытий на лентах длиной до 10 м;
- 4) получить образцы ВТСП-материалов 2-го поколения с $j_c > 10^6 \text{ А/см}^2$;
- 5) создать образец сверхпроводящего кабеля 2-го поколения длиной 10 м. Исполнители и

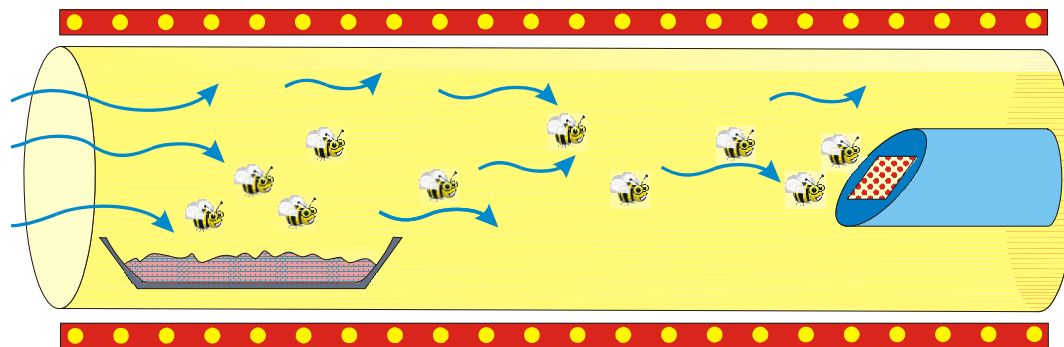


Рис. Схема $MOCVD$ процесса

распределение работ:

- 1) ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт», Москва - координация проекта; измерение сверхпроводящих характеристик; конструирование токонесущего элемента;
- 2) МГУ им. Ломоносова, Химический факультет - разработка $MOCVD$ технологии сверхпроводников на длинномерных металлических лентах;
- 3) Институт физики металлов РАН, Екатеринбург - разработка составов и технологии получения текстурированных сплавов;
- 4) ОИВТ РАН, Москва - тестирование сверхпроводящих лент;
- 5) ГНЦ ВНИИИМ им. Бочвара, Москва - разработка технологии длинномерных металлических лент-подложек.

Кроме того, в разработке участвует традиционный партнер университетской группы - Институт технологии поверхности, Брауншвейг, Германия.

Над разработкой технологии сверхпроводящих лент с $YBCO$ покрытиями группа Кауля трудится с 1997 года. В результате этой активности создана лабораторная технология получения текстурированных лент высокого качества из никелевых сплавов (в ИФМ УрО РАН). На основе недорогого и высокопроизводительного метода химического осаждения из газовой фазы ($MOCVD$) в МГУ разработаны оригинальные подходы к получению текстурированных покрытий на движущиеся ленты. В результате многолетнего сотрудничества с Институтом поверхности в Брауншвейге (Германия) с использованием метода $MOCVD$ получены 2G-проводники на лентах из $Ni-W$.

Преимущества $MOCVD$ перед физическими методами осаждения:

- высокая скорость осаждения (до ~ 10 мкм/час);
- низковакуумная аппаратура (10^{-1} -10 Торр);
- осаждение на сложные поверхности.

Надо отметить, что технология *MOCVD* успешно используется одним из лидеров области *IGC SuperPower* для получения слоя *YBCO*. Однако буферные слои высокого качества на металлических лентах с использованием метода *MOCVD* в мире не умеет получать практически никто, кроме москвичей выполняемая в настоящий момент химфаком в сотрудничестве с ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт» и ВНИИ им. Бочвара работа по госконтракту является единственной деятельностью по созданию 2G-проводников в нашей стране. В конце этого года должны быть продемонстрированы первые покрытые ВТСП ленты с длиной до 10 м.

На сегодняшний день проведены следующие научные исследования:

- изучено образование кубической текстуры в различных сплавах *Ni*;
- найдены легирующие компоненты, одновременно повышающие устойчивость текстуры, упрочняющие прокатанные ленты и снижающие температуры Кюри ниже 77 К;
- найденные технологические подходы при реализации деформации литых сплавов и последующего отжига позволили получить образцы лент-субстратов с кубической текстурой и рассеянием в направлении прокатки порядка $5,7^\circ$;
- разработаны режимы электрополировки, подготавливающие поверхность лент для последующей эпитаксии буферного слоя и слоя сверхпроводника. разработан процесс *MOCVD* буферных слоев *MgO* в низкотемпературных условиях, исключаящих окисление *RABiTS Ni(5%W)*;
- установлены P_{O_2} - T условия процесса *MOCVD*, позволяющие получить проводящие буферные слои допированного манганита лантана, без осложнений, вызванных окислением *RABiTS Ni(5%W)*; необходимые P_{O_2} - T условия создаются в специальных восстановительных атмосферах, формируемых потоками инертного газа, водорода (или аммиака) и паров воды;
- изучен сложный механизм поверхностного окисления сплава *Ni(5%W)*, нашедшего наиболее широкое применение в технологии *RABiTS*; разработана лабораторная установка для непрерывного нанесения буферных слоев и слоев ВТСП на металлические ленты (длиной до 10 м) методом *MOCVD* из паров бета-дикетонатов металлов;
- созданы методики и приспособления для осуществления измерений транспортного тока (в том числе в магнитном поле) в сверхпроводниках 2-го поколения.

В перспективе на основе результатов работы по Госконтракту ФАНИ планируется создать в 3-х летний срок опытное производство 100 м ВТСП-кабелей 2-го поколения, реализующего концепцию «*RABiTS – MOCVD*».

С.Самойленков

Силовые ВТСП кабели во ВНИИКП

«Разработка силовых сверхпроводящих кабелей для электроэнергетики - современное состояние» - доклад на эту тему представили на конференции директор по научной работе ОАО «ВНИИКП» В.Е. Сытников и заведующий лабораторией того же института В.С. Высоцкий.

Экономические перспективы ВТСП.

Среди возможных применений ВТСП наиболее продвинуты силовые кабели для энергетики. Даже при современном уровне цен на исходные ВТСП материалы (~100-180 долл./кА·м) силовые кабели экономически выгодны при уровнях энергии от 0,3-0,5 ГВА. При ожидаемом снижении цен на ВТСП материалы первого поколения (1G) до 50-30 долл./кА·м и при ожидаемых ценах на ВТСП второго поколения (2G) до 10-20 долл./кА·м ВТСП кабели станут абсолютно экономически выгодными при уровнях передачи энергии порядка десятков – сотен МВА

Состояние работ по ВТСП силовым кабелям в мире.

На сегодня при долевым финансировании промышленными компаниями и правительствами в мире выполняются более 10 крупных проектов.

Некоторые примеры:

ВТСП кабели, установленные в коммерческих сетях:

- 3 x 30 м, 1250 А, 12,4 кВ, 2000 г. в локальной энергосети заводов Southwire, США, общая наработка более 30000 часов;

- 3 x 30 м, 2000 А, 36 кВ, 2001 г. в электросети Копенгагена - Дания;

- 3 x 75 м, 1600 А, 400 В, 2004 г. для энергообеспечения заводов компании Changton в г. Байин, Китай;

- 3 x 30 м, 2000 А, 35 кВ, 2005 г. в локальной сети провинции Юннань, Китай.

Крупные предкоммерческие проекты:

3 x 100 м, 1000 А, 66 кВ Sumitomo-CRIEPI, на демонстрационном полигоне CRIEPI, Токио, Япония;

1 x 500 м, 1000А, 77 кВ испытания закончены в 2005 г. (кабель изготовлен компанией Furukawa, а испытания проведены на демонстрационном полигоне CRIEPI, Япония);

200 м, 3000 А, 13,2 кВ, триаксиальный кабель Columbus, Огайо, США; в процессе изготовления и подготовки к испытаниям;

3 x 350 м, 800А, 34,5 кВ подземный ВТСП-кабель в Олбани, шт. Нью-Йорк, США – планируется запуск в коммерческую сеть 2006 году (1G кабель типа «три в одном» поставлен компанией Sumitomo, в дальнейшем планируется сделать вставку длиной 30 м из 2G проводников).

650 м, 2400 А, 138 кВ проект LIPA, запуск в сентябре 2006 г. в Лонг-Айленде, Нью-Йорк, США; (наиболее мощный ВТСП кабель к настоящему времени, кабель изготавливается компанией Nexans, исходные ленты компании AMSC).

Мировая тенденция свидетельствует о том, что на рубеже 2008-2010 гг. будет начато практическое использование сверхпроводимости в электроэнергетике. Существуют реальные предкоммерческие проекты ВТСП кабелей, есть прототипы с хорошим опытом эксплуатации, возможна экономическая эффективность при нынешних или близких к ним ценам на сверхпроводящий материалы.

Проект ВТСП кабеля ФСК – ВНИИКП – что сделано в 2005 году и состояние на сегодня

ВНИИКП имеет давний опыт создания сверхпроводящих силовых кабелей:

разработки 70-х годов - ВТСП кабели; испытан прототип длиной 50 м, кабель Nb₃Sn с рекордным током 126кА;

в 2001 году разработан и испытан ВТСП кабель совместно с компанией CONDUMEX (Мексика); с мировым рекордом по токам – ≥10кА (испытания проведены в Мексике);

В мае 2005 при поддержке ФСК «ЕЭС» ВНИИКП приступил к созданию и испытанию на объектах ФСК ЕЭС реально работающего прототипа силового ВТСП кабеля длиной 30 м.

Задачи проекта:

- выбор и оптимизация конструкции кабеля;
- разработка технологии изготовления ВТСП кабеля;
- создание испытательных стендов для малых моделей и демонстрационных прототипов.

Основные параметры создаваемого прототипа:

Длина – 30 м, три фазы

Рабочий ток 1-2 кАгмс

Напряжение – не менее 16 кВ

Рабочая температура 65 – 80К

Охлаждение кабеля – жидкий азот.

ВНИИКП провел уникальную работу по оценке качества ВТСП лент различных поставщиков (отечественных и зарубежных). В эксперименте каждая из фаз кабеля была изготовлена из ВТСП лент различных поставщиков при сохранении общих рабочих характеристик кабеля.

В 2005 году проанализированы 11 типов лент от 6 производителей. Исследовали и анализировали следующие параметры:

- токонесущая способность в магнитных полях различной ориентации;
- механические свойства (в том числе, при укладке кабельных повивов);
- устойчивость к вздутиям (bubbling, ballooning);
- гистерезисные потери;
- технологичность (удобство в работе, пайка);
- цены и условия поставки.

В результате проведенных интенсивных исследований ВНИИКП владеет обширной базой данных по всем мировым производителям ВТСП лент первого поколения (1G). Для проекта ФСК-ВНИИКП выбраны ленты AMSC, Sumitomo и EAS.

В ходе работ в 2005 году разработан и изготовлен испытательный стенд для коротких (до 5 м), но полномасштабных по сечению моделей кабелей.

На сегодня ВНИИКП провел следующие работы по созданию конструкции и технологии производства ВТСП кабеля:

- разработана технология изготовления центрального опорного элемента – формера;
- разработана технология укладки лент;
- изготовлен макет жилы (на рис. 1 – пример);
- отработана технология укладки лент, сохраняющая их сверхпроводящие свойства без изменений;
- изготовлен полномасштабный по сечению отрезок жилы кабеля длиной 5 м (на рис.2 – пример)

В 2006 г. (апрель - май) проведены первые испытания полномасштабной по сечению модели кабеля длиной 5 м:

- максимальный ток, введенный в кабель, составил 4560 А без перехода в нормальное состояние;
- ток величиной 4,5 кА вводили 15 раз при сохранении стабильности.

ВНИИКП завершил первые испытания полномасштабного 5-метрового отрезка сверхпроводящего силового кабеля (из пресс-релиза ОАО «ВНИИКП»). Изготовленный полномасштабный по сечению отрезок жилы кабеля имеет центральный канал и спиральный формер с обмоткой медной лентой. Кабель имеет два повива, каждый из 24-х ламинированных латуной ВТСП лент типа «Герметик» производства компании AMSC (American Superconductor). Испытания кабеля проводили на стенде ВНИИКП. В режиме постоянного тока достигнут максимальный ток в 5.68 кА. Это означает 100% использование сверхпроводя-

щих параметров базовых ВТСП лент. В режиме переменного тока достигнут максимальный ток 3,5 кА действующего значения (около 5 кА амплитудного значения), распределение тока между пови-

вами очень близко к равномерному, разброс не более 2%.

В.Высоцкий

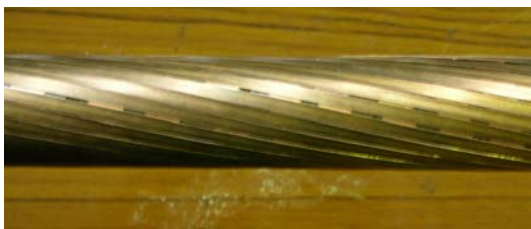


Рис. 1. Макет жилы ВТСП кабеля



Рис. 2. Кабель в защитной обмотке из нержавеющей стали

Комплекс сверхпроводникового оборудования

«Проблемы создания комплексов сверхпроводникового оборудования» - доклад на эту тему представлен Е.Н. Андреевым (ФГУП «НИИЭлектромаш») и Л.И. Чубраевой (НИИ ИТЭЭ ГУАП). Заказчик работы – Роснаука. Научный руководитель работ - член-корр. РАН Л.И. Чубраева.

Головной исполнитель - Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии».

Соисполнители:

1. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН;
2. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт электромашиностроения»;
3. Научно-исследовательский институт инновационных технологий в электромеханике и энергетике ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»;

4. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (Государственный технический университет)»;
5. Институт теплофизики Уральского отделения РАН. В планах – разработка комплекса сверхпроводникового оборудования для мини-ГЭС и ветроэнергетической установки на морской платформе. При всей важности разработки отдельных ВТСП устройств особый интерес для электроэнергетики представляет работа полностью сверхпроводникового комплекса, в котором ВТСП генераторы, трансформаторы, ограничители токов и другие устройства соединены ВТСП кабелем. Именно такую задачу поставила Роснаука перед исполнителями контракта, руководимого Л.И.Чубраевой – проверить работу полностью сверхпроводникового электроэнергетического комплекса на основе моделей и прототипов будущих ВТСП устройств.

В ходе работ по контракту разработана структурная схема прототипа комплекса сверхпроводникового электроэнергетического оборудования:



Для каждого из устройств будущего комплекса намечены достижимые в рамках современной технологии параметры.

Планируемые параметры синхронного генератора с обмоткой статора из ВТСП материала:

Номинальная мощность, кВт	50
Номинальное линейное напряжение, В	690
Номинальный фазный ток, А	52.2
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Номинальная частота, Гц	50
cos φ	0.8
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.	0.50
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси, о.е.	0.37
Расход сверхпроводника на обмотку статора, м	580

Планируемые параметры трехфазного трансформатора с обмотками из ВТСП материала и сердечником из аморфной стали (на сегодняшний день исследована модель однофазного трансформатора):

Номинальная мощность, кВ×А	60
Номинальное линейное напряжение, В	690/400
Номинальный фазный ток, А	50.2/86.6
Расход сверхпроводника на 3 фазы, м	610
Суммарный вес активных материалов, кг	100

Планируемые параметры многодискового синхронного двигателя с комбинированным индуктором из редкоземельных постоянных магнитов и ВТСП массивов:

Номинальная мощность, кВт	50
Номинальное линейное напряжение, В	380
Номинальный фазный ток, А	91.8
Номинальная частота вращения, об/мин	375
cos φ	0.9
Синхронное индуктивное сопротивление, о.е.	0.5
Масса, кг	100

Разработаны и изготовлены прототипы многодисковых синхронных двигателей (см. фото).

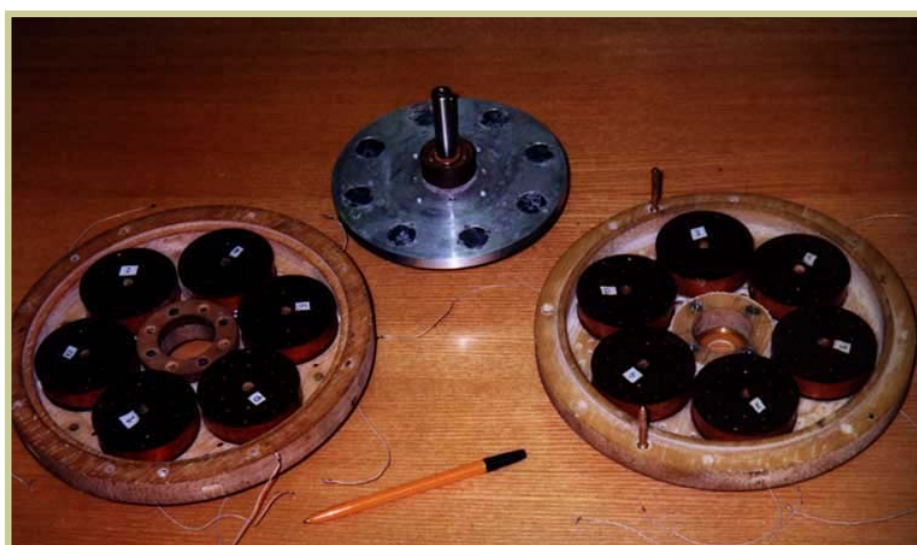


Рис. Прототипы многодисковых синхронных двигателей.

Перед исполнителями контракта в текущем году стоят следующие основные научные задачи:

- 1) исследовать синхронную машину с ВТСП обмоткой якоря в режиме генератора, двигателя, компенсатора;
- 2) исследовать режимы синхронизации с сетью бесконечной мощности;
- 3) исследовать ВТСП трансформатор;
- 4) исследовать комплекс: синхронный генератор – кабель – трансформатор;
- 5) исследовать комплекс: трансформатор – преобразователь;
- 6) исследовать дисковую машину в режимах генератора и двигателя;
- 7) исследовать комплекс: преобразователь – синхронный двигатель – нагрузка;
- 8) исследовать синхронизацию элементов автономной установки;
- 9) исследовать всю установку в целом.

ВТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

AMSC полностью переходит на выпуск 2G

1 мая 2006 г. компания American Superconductor Corp. (AMSC) объявила о прекращении выпуска 1G проводов и полном переводе производственных мощностей на выпуск проводов второго поколения (2G). За прошедшие годы AMSC поставила 1G провода 95 заказчикам в 20 стран для использования в самых различных электротехнических и электроэнергетических устройствах и это позволяет надеяться на то, что большинство заказчиков перейдут на 2G провода. С марта 2006 г. AMSC уже отгрузила 2,7 км 2G провода 344 стандарта и предполагает поставить заказчикам еще 10 км в течении текущего финансового года. Первые ВТСП провода марки 344 компания поставила 18 потребителям в 7 странах мира (США, Китай, Германия, Япония, Корея, Новая Зеландия и Швейцария).

Окончание производства 1G проводников также связано с огромными запасами этого продукта в компании (около 400 км высококачественных 1G проводов), что позволит покрыть возможные заказы. В связи переходом на 2G провода AMSC предполагает списать более чем на 5 миллионов долларов технологического оборудования и часть остатков 1G проводников на сумму в 1,5-2 млн. долл.

AMSC надеется на то, что наращивание объемов выпуска 2G проводов позволит снизить их цену и сделать более привлекательным для потенциальных заказчиков.

Компания продемонстрировала также ВТСП размагничивающий кабель длиной 40 м, разработанный специально для применения на военных кораблях. Он имеет существенно меньшие вес (20% от медного размагниченного кабеля), рабочее напряжение (меньше 0,5 В) и потребляемую мощность, также сниженные эксплуатационные расходы (40%) в сравнении с медными кабелями. Еже-

годный мировой рынок размагничивающих кабелей оценивается в 100 млн. долл.

И.А. Руднев

<http://www.amsuper.com/>

2G в Японии

О состоянии дел с разработкой 2G-лент в Японии на EUCAS 2005 доложил Y.Shiohara (Superconductivity Research Laboratory - ISTE) [1]. Пятилетний национальный проект по созданию технологии ВТСП лент 2-го поколения стартовал в этой стране в 2003 г. Работа ведется сразу по нескольким направлениям в форме сотрудничества университетов и частных компаний и курируется Министерством экономики, торговли и промышленности (METI). Кратко перечислим основные достижения японских исследователей:

2G-лента большой длины с высокими характеристиками. Основную исследовательскую силу в этом направлении представляют SRL Nagoya Coated Conductor Center (NCCC) и Fujikura Ltd. В этой программе стоимость ленты не принадлежит к основным приоритетам, поэтому используются дорогостоящие, но хорошо зарекомендовавшие себя методы IBAD и PLD. Создание IBAD-установок высокой производительности (ионный источник с площадью $15 \times 100 \text{ см}^2$) и применение $Gd_2Zr_2O_7$ в качестве материала буферного слоя позволили добиться скорости осаждения буфера 1 м/час. Показано, что слой CeO_2 , наносимый методом PLD на IBAD- $Gd_2Zr_2O_7$, эффективно улучшает текстуру. На таких двойных буферных слоях с использованием PLD и многократного прохождения ленты через зону осаждения (multiturn system) получены длинномерные ленты высокого качества: $I_c = 245 \text{ А}$ на сантиметр ширины при длине ленты 212 метров. Последнее достижение представлялось на конференции как мировой рекорд. Японские исследователи не теряют надежды на понижение стоимости такой 2G-ленты в будущем. Основным аргументом здесь является развитие метода высокоскоростного PLD (HR-PLD), разработанного в европейской компании EHTS.

- Недорогая 2G-лента. Исследования в данном направлении ведутся японцами с использованием двух методов – MOD (SRL-Tokyo и Showa Electric Wire and Cable Inc.) и MOCVD (Chubu Electric Power Company). MOD из трифторацетатов позволяет получать ВТСП с током 100 А на ленте длиной 25 м, что является весьма хорошим достижением. Однако в этом случае используется лента с „дорогим“ PLD/IBAD-подслоем. На этих же буферных слоях, полученных методом MOCVD, продемонстрирован ток 96 А на см ширины для ленты длиной 92 м. На буферных слоях, полученных с использованием MOD, результаты гораздо скромнее (низкая T_c, j_c порядка 10^5 А/см^2). Метод MOCVD для получения буферных слоев японцы не применяют.

Согласно национальному проекту, к концу 2007-го года должны быть продемонстрированы ленты длиной не менее 500 м с током выше 300 А (30 А в поле 3 Т), полученные со скоростью 5 м/час. Стоимость таких лент должна составить не более 12 иен за А·м для «дорогого» подхода и не более 8 иен за А·м для «экономичного» метода. В переводе в более привычные единицы, это означает 107 долл./кА·м и 71 долл./кА·м, соответственно.

С.Самойленков

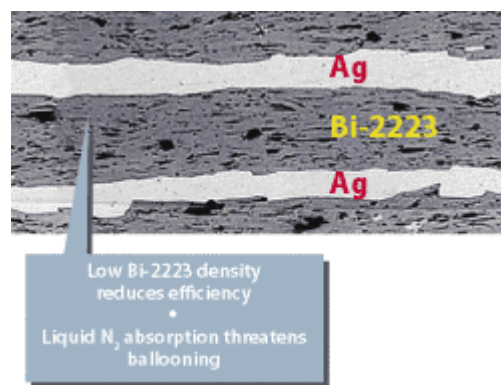
1. *Supercond. Sci. Technol.* 2006, **19**, S4-S12.

Sumitomo упорно сохраняет 1G технологию

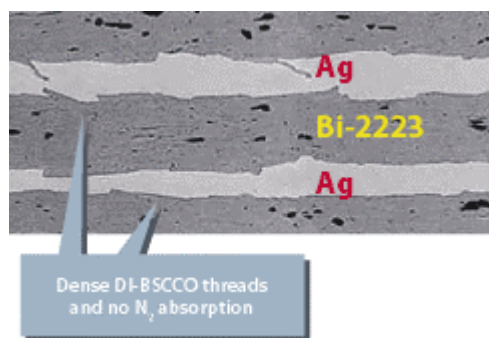
Sumitomo (Япония) продолжает совершенствовать технологию ВТСП проводов 1-го поколения на ос-

нове *BSCCO*. Разработан процесс синтеза ВТСП ленты, включающий финальную термообработку (скорее, спекание) при 800-900°C в смеси чистого кислорода и инертного газа под давлением 10-15 МПа - **Controlled Temperature Over Pressure (CT-OP)**.

В результате формируется ВТСП слой с высокой (100%) плотностью. Ленты, полученные по технологии *CT-OP*, известные под фирменной маркой *DI-BSCCO™* (*DI = Drastically Innovated*), имеют повышенную стабильность и хорошие токовые характеристики. Процесс *CT-OP™* освоен и позволяет производить провод длиной до 1500 м в коммерческом масштабе.



Традиционный *BSCCO* провод 1-го поколения



DI-BSCCO провод 1-го поколения

Рис. 1. Сравнение микроструктуры поперечного сечения традиционных ВТСП лент 1-го поколения и *DI-BSCCO™*. Легко видна более плотная структура провода, полученного в процессе синтеза при высоком давлении.

Таблица. Параметры *DI-BSCCO™* ленты.

Параметры	Оптимизация по I_c	Оптимизация по механическим свойствам
Ширина		$4,3 \pm 0,2$ мм
Толщина		$0,22 \pm 0,02$ мм
Максимальная длина в одном куске		1500
I_c (77К, собственное поле)	110/125/150 А	80/100/110 А
J_c (77К, собственное поле)	11/12,5/15 кА/см ²	8/10/11 кА/см ²
I_c (20К, 2Тл)	275/313/375 А	200/250/275 А
J_c (20К, 2Тл)	27/31/37 кА/см ²	20/25/27 кА/см ²
Критическое натяжение в резистивном состоянии	100 МПа	170 МПа
Критическое натяжение при 77К	160 МПа	230 МПа
Критический диаметр скрутки	70 мм	50 мм

На основе ленты *DI-BSCCO™* Sumitomo Electric выпускает кабель под фирменной маркой 3-in-One™ (3-Core in One Cryostat – 3 провода в одной криоболочке) для линий электропередач. Совместно с Tokyo Electric Power Company (*TEPCO*) и Central Research Institute of Electric Power Industry (*CRIEPI*), Sumitomo Electric успешно завершила длительные

испытания кабеля (напряжение 66 кВ, ток 1 кА, длина 100 м в изолирующей трубе) на испытательном полигоне *CRIEPI* в Йокосуки (вблизи Токио) в июне 2002 года. Кабель (длина 350 м, 34,5 кВ, 800 А) изготовлен также для компании Niagara Mohawk и будет установлен под землей в распределительной линии электропередач. За разработку этого кабеля Sumitomo получила 7 млн. долл. от инвесторов проекта.

На сегодня Sumitomo имеет 1G кабель с токами до 200 А, что сравнимо с достижениями в 2G кабелях.

Спецификация кабеля Sumitomo

Напряжение	6 кVrms
Ток	1 кArms
Расположение	Наземный, установлен в трубопроводе диаметром 150 мм
Охлаждение	Циркуляция охлажденного жидкого азота
Характеристики кабеля	
Форма	3 в одном криостате
Электрическая изоляция	PPLP (Polypropylene Laminated Paper), импрегнированная жидким азотом
Выводы	6 (конечный бокс - на воздухе)

Результаты испытаний

Напряжение	Переменное 130 кВ
Емкость, tgφ	0,24 мкФ/км, 0,08% при 77 К
Критический ток	$I_c > 2700$ А (постоянный ток) для 100 м кабеля
Механические свойства	Не деградирует при диаметре скрутки 1,9 м
Потери на переменном токе	20 Вт/м (для 3-х фаз) при переменном токе 1 кА (0,65 на фазу)

<http://www.sumitomoelectricusa.com/scripts/products/scc/cable.cfm>

<http://www.sumitomoelectricusa.com/scripts/products/scc/wire.cfm>

ВТСП УСТРОЙСТВА В ДЕЙСТВИИ

ВТСП трансформатор в энергетической сети Китая

8 марта 2006 г. компания American Superconductor (AMSC) и Китайский электротехнический институт (China's Institute of Electrical Engineering - IEE) продемонстрировали первый сверхпроводящий трансформатор в энергетической сети Китая. Трансформатор был изготовлен IEE в сотрудничестве с TBEA Industrial Transformer Group – крупнейшим производителем трансформаторной продукции в Китае. В качестве токонесущего элемента были применены ВТСП провода AMSC.

Трехфазный трансформатор мощностью 630 кВА предназначен для понижения напряжения от 10 кВ до 400 В. Полный к.п.д. этого устройства (с учетом понижения потерь за счет использования ВТСП провода и аморфного сердечника) составляет 98,3%. При этом разработчики считают, что за счет оптимизации конструкции можно будет добиться к.п.д. 99,9%. ВТСП трансформатор работает с 21 ноября 2005 г. в силовой сети Changji провинции Xinjiang, обслуживая завод TBEA.

Согласно оценке Министерства энергетики США, ежегодный мировой рынок трансформаторов мощностью выше 10 МВА превосходит 1 млрд. долл. с тенденцией быстрого роста продаж за пределами США. Так, если в 2001 г. в Китае рост энергопотребления составлял 9%, то в 2004 г. эта цифра увеличилась до 14,8%. В США за тот же период отмечено увеличение годового энергопотребления примерно на 2-3%.

Представители Китая считают, что столь бурный рост энергопотребления должен быть подкреплен внедрением новых инновационных технологий, таких как сверхпроводящие трансформаторы, ограничители тока, линии электропередач. Такая замена станет гарантией надежности и стабильности работы энергетических систем в целом.

И.Руднев

<http://www.amsuper.com>

Рост заказов на системы стабилизации напряжения компании AMSC

American Superconductor (AMSC) приняла заказ от Windtec Systemtechnik (Австрия) на поставку системы управления PowerModule™, предназначенной для 150 ветряных турбин, которые будут установлены в Китае. Система PowerModule™ будет использована в электрическом оборудовании ветряных турбинных 1,5 МВт генераторов. Ранее AMSC уже поставила компании Windtec системы, включающие PowerModule PM1000 и ВТСП динамический реактивный регулятор мощности D-VAR(R), для установки на 23 ветряных турбинах в Китае и Японии.

Серия преобразователей мощности PowerModule™ предназначена для поддержки любых типов преобразования (AC-AC, AC-DC, DC-DC или DC-AC) и может применяться для различных промышленных целей, включая:

- накопители энергии (индуктивные и кинетические накопители, батареи);
- бесперебойные источники питания (UPS);

- генераторы электроэнергии (топливные ячейки, микротурбины, ветряные турбины, фотовольтаические устройства);
- регуляторы мощности;
- источники постоянного тока.

Спецификации PowerModule™

Входное напряжение	от 230 до 690 V _{ac} (от +15% до -50%); до 1200 V _{dc}
Выходная частота	от DC до > 400 Гц или синхронизована с входной
Частота переключения	4 кГц стандартная до 16 кГц
Эффективность преобразования	типично до 98% при полной нагрузке

AMSC и GE Energy приняли заказ от Detroit Public Lighting Department на изготовление и поставку двух D-VAR(R) систем для электросети Детройта (Municipal Electrical Utility) [1]. По оценкам, установка этой системы позволит экономить ежегодно до 10 млн. долл. на эксплуатационных расходах. D-VAR система обеспечивает стабильное напряжение в сети, которое традиционно поддерживается более дорогими электрическими генераторами. Системы будут установлены в конце лета 2006 года на 24 кВ подстанции в Детройте. Заказ на D-VAR(R) AMSC и GE Energy получили также от компании Aquila, Inc. для усиления стабильности напряжения в системе передачи электроэнергии этой компании (Kansas City, Missouri), которая работает с распределением электричества и натурального газа потребителям шести штатам США [2]. Система будет задействована на Aquila's Plainville подстанции в июне 2006 г.

Еще один заказ на D-VAR систему регулирования напряжения получен от компании Econnect Construction (<http://www.econnect.com>) для 35МВт ветряной турбины. Система будет установлена осенью 2006 г. Econnect была основана в 1995 г. двумя инженерами с целью разработки систем интеграции энергоресурсов источников возобновляемой энергии с общими электросетями. В настоящее время в связи с ростом интереса к возобновляемым источникам энергии компания переживает бум заказов и занимает блестящую позицию на этом рынке. Econnect открыла свои зарубежные офисы в Австралии и Ирландии. Компания поставляет экологически чистую электроэнергию в более 100 000 домов

1. <http://www.amsuper.com/products/powerConversion/103419060731.cfm>
2. <http://www.amsuper.com/products/applications/windEnergy/index.cfm>

ИННОВАЦИИ И ПОЛИТИКА Президент SuperPower о ВТСП электроэнергетике

В августе 2005 г. Philip Pelegriano, президент SuperPower, Inc., сделал краткий обзор состояния и прогноз производства ВТСП для Министерства энерге-

тики США. Intermagnetic General Corp.(IGC) начала разработки ВТСП устройств в 1988 году, спустя два года после открытия ВТСП (1986г.). В 2000 г. для этих целей IGC основала дочернюю компанию Super Power Inc. До заметного прорыва в ВТСП устройствах для электроэнергетики компании потребовалось 20 лет. Интересно отметить, что много сил было затрачено на патентные тяжбы с другими компаниями, пока каждая из них не сделала окончательного выбора своего курса.

Участники гонки приходили в ВТСП электроэнергетику и уходили. Среди них действительно было много значительных ведущих многонациональных компаний, которые вступали в игру, тратили миллионы долларов, и теперь – или на обочине, возможно ожидая появления 2G провода, или – совсем вне игры. Отслеживая состояние разработок, возможно, некоторые из них вернутся.

Такие страны, как Китай, Южная Корея, Индия, Восточная Европа, если и не вкладывали в прошлом миллионы долларов, то кажется, готовы это сделать сейчас, учитывая ошибки и достижения компаний, действующих на ВТСП поле. Одним из самых ранних зачинателей ВТСП исследований была Япония, правительство которой выделяет на ВТСП исследования ежегодно 50-60 млн. долл. Южная Корея вложила 100 млн. долл. через свои программы перспективных исследований. В Китае в связи с высоким темпом индустриализации ежегодно на 10-15% растет потребление электроэнергии, отсюда готовность правительства Китая наращивать инвестиции в исследования ВТСП, как существенные для обновления постоянно расширяющейся инфраструктуры электроснабжения.

Министерство энергетики США (DoE) инвестировало более 500 млн. долл. в ВТСП исследования и разработки, отнесенные Белым Домом к национальному приоритету. И все же существует трудность в получении достаточного объема финансирования (см. таблицу).

ВТСП бюджет DoE		
Финансовый год	Реальное финансирование (млн. долл.)	Потребность (млн. долл.)
2003	38	48
2004	32	48
2005	39	45
2006 (оценка)	35-37	45

Фонд Министерства энергетики существенно пополняют военные ведомства, так как ВТСП энергетические разработки имеют первостепенную важность для национальной безопасности. Они могут пригодиться в программе военных по оружию с направленной энергией, например, в микроволновых импульсных лазерах высокой мощности, рельсовых пушках и системах магнитного пуска. Имеется также программа полностью «электрического» корабля для ВМФ.

Частные компании в таких рискованных разработках, как ВТСП, сильно зависят от бюджетного финансирования, и потому их представители часто посещают Капитолийский Холл в надежде заручиться поддержкой конгрессменов. В 2005 году SuperPower стараниями своего ангела - сенатора Domenichi получила существенную финансовую помощь от правительства в поддержку ВТСП разработок – 10 млн. долл. Частному сектору нужна не только отвага в научных и технологических разработках, но и умение выжить в отношениях с Правительством. Могущественная поддержка на Холме существенна, важно сохранить приоритет в жесткой конкуренции за сужение круга пользователей федеральными долларами. Необходимо обучаться общению с членами Правительства и Конгресса. Можно не сомневаться, что если бы не федеральное финансирование, а также финансирования от регионального бюджета, частный сектор не вошел бы в ВТСП игру. Частный сектор имеет очень сильное побуждение присоединиться к исследованиям и разработкам на возможно более ранних этапах, что облегчает будущее коммерческое выживание. Нужно не забывать, что самые важные технологические прорывы не приходят за одну ночь, на них требуются десятки лет. На каждый победный трепет приходится гораздо больше агонии разочарования.

Частный сектор в рискованных разработках имеет дело не только с высоким техническим, но и с высоким финансовым риском. Благоразумная нерасположенность к риску – вот лозунг частного сектора. Другой лозунг – «Покупатель – Король»: мы не можем диктовать, какие изделия покупать нашим клиентам. Электроэнергетика требует, во-первых и прежде всего, надежности, затем – эффективности (отношение параметры/стоимость) и, наконец, строгого соблюдения стандартов на параметры оборудования. Все это на первых порах будет огромными препятствиями для незрелых ВТСП изделий и приборов.

Справедливость требует отметить, что со времени открытия сверхпроводимости в начале двадцатого столетия техника магнитного резонанса была единственным и главным коммерческим использованием низкотемпературной сверхпроводимости, а с ВТСП мир еще в процессе разработок без каких-нибудь заметных внедренческих достижений.

Благодаря Программе SPI (Superconductivity Partner Initiative) удалось продемонстрировать множество прототипов электроэнергетических устройств – индукционные и кинетические накопители, моторы, генераторы, магнитные сепараторы, ВТСП кабели и ограничители аварийных токов. Решающий фактор, обеспечивший этот успех, связан с тем, что несколько компаний в мире, вложив в совокупности сотни миллионов долларов, обеспечили разработчиков устройств ВТСП проводом 1-го поколения (1G). Сегодня в фокусе – разворот к доступности ВТСП проводов 2-го поколения (2G).

Станет ли ВТСП стимулом технологической революции для мощной электроэнергетической промышленности, подобно той, которой стало оптоволокно для телекоммуникационной промышленности? Об этом говорить еще слишком рано. Министерство энергетики выразило заинтересованность в новом витке интенсивных разработок 2G ВТСП проводов. Если заинтересованность выразится в финансировании активных компаний в 2007 г., то новые демонстрационные образцы могут стать реально коммерческими.

ВТСП энергетическая программа Ю.Кореи

DAPAS (Development of Advanced Power System by Applied Superconductivity Technology) – десятилетняя государственная программа Ю. Кореи, цель которой - исследования, разработки и коммерциализация ВТСП устройств. Объем финансирования в 2001-2010 г.г. – 146 млн. долл. (100 млн. долл. – бюджет + 46 млн. долл. – промышленность).

В Программу включены следующие позиции:

1. Разработка покрытых ВТСП проводников 2-го поколения:

- Метод импульсного лазерного осаждения и термическое осаждение (PLD & evaporation) – KERI;
- Метод осаждения из жидкого металлоорганического раствора (MOD) - KIMM;
- Технология текстурирования подложек.

2. Разработка приборов и устройств для электроэнергетики:

- ВТСП кабель – KERI;
- ВТСП трансформатор – KPU;
- ВТСП токоограничитель, использующий ВТСП проводники 2-го поколения – YSU;
- ВТСП токоограничитель, использующий ВТСП массивные образцы Bi-системы – KEPRI;
- ВТСП мотор – KERI.

Программа идет под эгидой Министерства науки и технологий (MOST), для ее управления создан специальный центр – CAST (Center for Applied Superconductivity Technology). Установлены основные цели каждого из трех этапов:

Что реально достигнуто на уровень 2005 года?

PLD – KERI. Ленты $L=135$ см, $I_c = 199,3$ А/см; $L=10$ м, $I_c = 61$ А/см.

Структура - NiW(OST)/Y₂O₃(DC reactive sputtering)/YSZ(PLD)/CeO₂(PLD)/YBCO(PLD)/Ag(DC sputtering).

MOD – KIMM. Ленты со структурой YBCO(MOD)/CeO₂/YSZ(IBAD)/substrate, $J_c=1,2$ МА/см².

Испытан трехфазный ВТСП 9 кВ кабель длиной 30 м на проводах 1-го поколения BSCCO-2223 (внешний диаметр 44 мм), потери на переменном токе при 1,2 кА, 77К – 3,0 Вт/м на 3 фазы.

Испытаны при T=65 К ВТСП трансформатор, 22,9 кВ, 1 МВА; ВТСП токоограничитель реакторного

типа класса 6,6 кВ на основе *Bi-2223*; ВТСП токоограничитель резистивного типа на покрытых ВТСП *YBCO* проводниках 2-го поколения класса 6,6 кВ (условия испытания – напряжение 3,8 кВ, критический ток 280 А, максимальный аварийный ток – 10

кА); ВТСП мотор 100 л.с., скорость вращения 1800 об./мин.

Изделия	2001-2003	2004-2006	2007-2010
	Достижимые параметры		
Подземные кабели	50 МВА, 29,5 кВ	500 МВА, 154 кВ	1 ГВА, 154 кВ
Трансформаторы	1 МВА, 29,5 кВ, однофазный	5 МВА, 154 кВ, однофазный	100 МВА, 154 кВ, трехфазный
Токоограничители	6,6 кВ, 200 Arms	22,9 кВ, 630 Arms	154 кВ, 2кArms
Моторы	100 л.с.	1 МВА	3-5 МВА

www.energetics.com/meetings/supercon04/

Использованные сокращения

KEPRI - Korea Electric Power Research Inst.
KERI - Korea Electrotechnology Research Inst.
KIMM - Korea Inst. of Machinery and Materials
KPU - Korea Politechnic Univ
YSU – Youngsun University

IBAD - ion beam assisted deposition (ионно-лучевое осаждение)
PLD – pulse laser deposition (импульсное лазерное осаждение)
MOD TFA - metal organic deposition (жидкостное осаждение из органических соединений) из trifluoroacetate (трифторацетат)

Издатель РИЦ «Курчатовский институт»

(при поддержке Фонда «Научный потенциал» и «НТИЦ Электроэнергетики»)

Научный редактор *Н.А. Черноплеков*, член-корр. РАН,
научный руководитель ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

Редактор *С.С. Иванов* ssi@iht.mpei.ac.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *С. Корецкая* stk@issp.ras.ru;
А. Чернышева chak@newmail.ru; *Ю. Метлин*, *И.Руднев*, *С.Самойленков*

Верстка *И. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Н. Морозова*