

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 2 выпуск 1
Февраль 2005

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы
Генераторы
Токоограничители

Инвесторы
Накопители

ВТСП В ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

ВТСП кабели в сети

Первый демонстрационный проект ВТСП кабеля в сети осуществлен фирмой Southwire (США) в 2001 году - трехфазный кабель, включенный в расщелку воздушной ЛЭП, питает медеплавильный завод фирмы в шт. Джорджия. При наработке более 10000 часов не выявлено никаких замечаний к кабельной системе.

В демонстрационной эксплуатации в Дании строит также ВТСП кабель, изготовленный компанией *NKT*. К сентябрю 2003 г. этот кабель наработал 1603 часа в холодном виде, 1491 час под нагрузкой (1157 А – максимальная нагрузка). Передано 226 кВт·час в течение 2-х лет. Выдержал один случай перегрузки в 6 кА в течение 142 мсек без повреждений.

В Китае в марте 2004 года ВТСП силовой кабель (диаметр 112 мм, длина 30 м, 3 фазы, 35 кВ/2 кА) установлен корпорацией Inopower на действующей Pujі подстанции локальной сети China Southern Power Grid (Kunming, провинция Юннань, Китай).

Завершается проект компании Long Island Authorities (США) - создание и установка в эксплуатацию трехфазного кабеля длиной 629 м – напряжение 138 кВ, ток 2,5 кА, мощность ~ 573 МВА. Аналогичный проект разрабатывает совместное предприятие Ultera, объединяющее компании Southwire и *NKT*. Предполагается установка в 2005 году 300-метрового ВТСП кабеля в систему American Electric Power в Коламбусе, шт. Огайо.

ВТСП регуляторы мощности (AMSC)

American Superconductor Corporation (*AMSC*) заявила о полной готовности четырех промышленных систем регулировки мощности *PQ-IVR™* (Power Quality Industrial Voltage Restorer), выполненных по заказу одного из мировых полупроводниковых производителей. Система *PQ-IVR* класса 42 МВА будет защищать системы распределения электропитания на одном из заводов по полупроводниковому производству в США. Система обнаруживает дрейф напряжения в течение миллисекунд, снимая проблему прежде, чем нарушится работа оборудования, чувствительного к стабильности питания.

И далее...

РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Макет курчатовского накопителя 2
ВТСП электрические машины..... 5

ЗАРУБЕЖНЫЕ РАЗРАБОТКИ

На повестке дня – СПИНЫ:
НТСП или ВТСП? 6

РОССИЙСКИЕ НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ

ВТСП второго поколения:
Россия в ожидании инвесторов 9

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОРПОРАЦИИ

Китай. Специализированные ВТСП
фирмы - Inppower, Innova..... 10

ВТСП МАТЕРИАЛЫ

Работы по длинномерным
ВТСП в Японии 12

КОНКУРСЫ

Роснаука дает шанс ВТСП 13

ТОРЖЕСТВА

2G рекорды сегодняшнего дня

AMSC (США) – 102 А на см ширины (65 К, 3 Тл - перпендикулярно поверхности ленты) - для быстродействующих генераторов и систем кинетического микроволнового вооружения. Успех обеспечило введение добавки гольмия в сверхпроводящее *YBCO* покрытие.

Nagoa Coated Conductor Center (Япония) - 182 А (77 К) *YBCO* лента длиной 45,8 м

По данным Electric Power Research Institute (EPRI), подобный дрейф напряжения и связанное с ним снижение качества электросетей приносит промышленности США убытки в размере 15-24 млрд. долл. в год. В конце 2004 года AMSC получила заказ от Vestas Wind Systems A/S, самого крупного в мире поставщика ветряных энергоустановок, на изготовление и установку двух устройств регулирования мощности D-VAR в локальной электросети поселка Saskatchewan в Канаде, обслуживающей 64 тысячи домов.

РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Макет курчатовского накопителя

В свое время Курчатовский институт изготовил макет сверхпроводящего индуктивного накопителя для корейской компании KEPCO (Kansai Electric Power Co.). Мы обратились к руководителю этого проекта проф. В.Е. Кейлину с просьбой прокомментировать разработку.

Теперь кажется, что это было давно, в начале 90-х годов. Корейская энергетическая компания KEPCO обратилась к нам через посредников с просьбой изготовить модель сверхпроводящего индуктивного накопителя своеобразной конфигурации, а именно, нужно было сделать два одинаковых накопителя и преобразователь, который бы позволял перекачивать энергию из одного накопителя в другой. Вся запасенная в одном накопителе энергия должна была перекачиваться в другой за 2 сек., и так многократно «туда-сюда». При этом один накопитель выступал как собственно накопитель, а второй – как индуктивная нагрузка, а в обратном цикле они обменивались функциями. Обычно говоря о сверхпроводящих накопителях, имеют в виду в основном сверхпроводящие катушки индуктивности, забывая о том, что нужен довольно сложный и хитроумный преобразователь, который как раз и передает накопленную энергию накопителя в электрическую сеть с самой разной нагрузкой. Чисто индуктивная нагрузка – это самый сложный вариант нагрузки. И вот именно этот вариант нам предлагалось реализовать

для корейской фирмы – модель «чисто индуктивный накопитель + второй накопитель, как чисто индуктивная нагрузка».

Такой вариант предъявлял жесткие требования именно к преобразователю. По заданию запасенная энергия в накопителя должна быть относительно малой, всего лишь 0,5 МДж, но она должна была передаваться из одной индуктивности в другую за 2 сек., и затем обратно. Были также сформулированы ограничения на электрические потери. Но все же самым трудным и неспецифическим для нас был именно этот преобразователь. И поэтому, несмотря на заманчивое для тех лет финансирование с корейской стороны, мы, тем не менее, колебались, брать ли за эту задачу.

Мы посетили несколько специализированных институтов, исследуя возможность заказа преобразователя у них. На словах они были готовы взяться за эту задачу. Однако увиденное нами заставило сработать инстинкт самосохранения. В конце концов, мы обратились за помощью к специалистам Института ядерного синтеза нашего многопрофильного Курчатовского центра, которые с успехом справились с этой задачей, разработав и изготовив достаточно сложный преобразователь, возможно, во многом определивший успех всего проекта.

В реальной сети, как правило, мы имеем дело с гибридной нагрузкой (резистивная + индуктивная). Но, наиболее трудный случай, это, как я уже говорил, перекачка энергии из индуктивной в индуктивную нагрузку. Решив эту задачу более 10 лет назад, мы уверены, что с другими видами нагрузки мы теперь, не то чтобы запросто, но точно справимся. Это уже вопрос не принципиальный. Конечно, накопитель для реальной сети – это другая задача, в которой нужны значительно большие энергии, большие напряжения, чем в нашем макете, но схемные решения вряд ли будут более сложными.

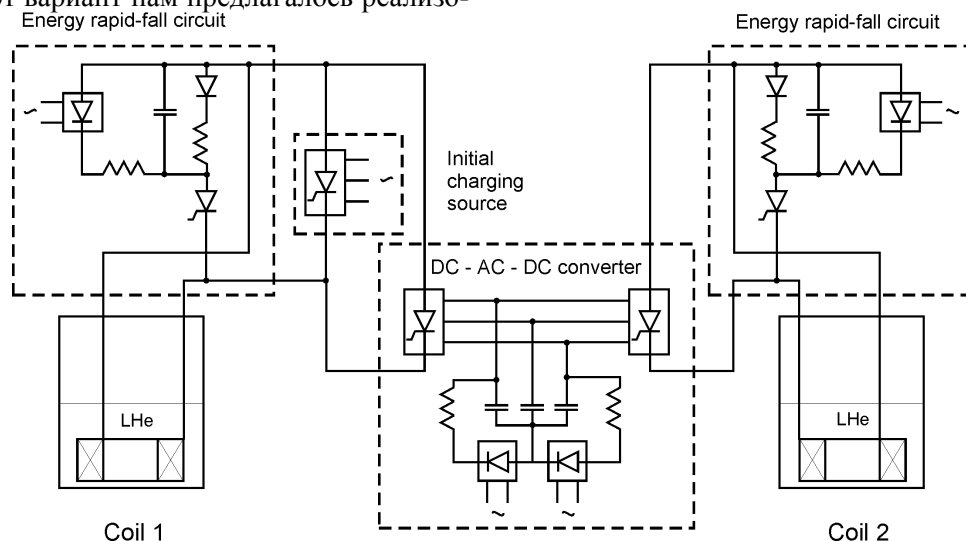


Рис. 1. Схема макета сверхпроводящего индуктивного накопителя

Что касается самого накопителя, то главное, к чему мы стремились, это найти простые решения, которые приводили бы к малым потерям при относительно быстрых изменениях магнитного поля (в данном случае 2 Тл/сек) и к достаточно экономичной установке, потому что, как мы знали, у нашего заказчика есть проблемы с жидким гелием.

Мы придерживаемся правила, что заказчик – это король, и потому при разработке старались не отходить от заданных заказчиком параметров. Не с первого раза, но были сделаны две сверхпроводящих катушки с запасенной энергией, заметно превышающей требуемые 0,5 МДж. При большем токе (2 кА) запасенная энергия достигала 1 МДж. Нам был задан ток 1,5 кА, и при этом токе запасенная энергия составляла как раз 0,5 МДж.

Для накопительной катушки использовали *NbTi* проводники. В жестких условиях начала 90-х годов в связи с прекращением производства сверхпроводников на Ульбинском металлургическом заводе (отшедшем к Казахстану) мы пришли к естественному решению использовать для токонесущих элементов провода, ранее наработанные для магнитов Ускорительно-накопительного комплекса, проектировавшегося в Институте физики высоких энергий (Протвино). Из доступных нам проводов они были наиболее подходящими для наших целей по числу и диаметру волокон, по току и т.д. Начались поиски относительно просто реализуемой в наших условиях конструкции токонесущих элементов с малыми потерями. Перепробовав несколько вариантов, мы остановились на варианте, напоминающем резерфордовский кабель, используемый обычно для ускорительных магнитов, правда, с весьма существенными изменениями.

В окончательной версии токонесущий элемент представлял собой сердечник из не очень чистой (для уменьшения вихревых потерь) меди (отношение удельного сопротивления при комнатной температуре к остаточному порядка 20). На круглый медный сердечник навивали *NbTi* провода, причем для уменьшения кооперативных потерь и для увеличения механической жесткости их навивали попеременно (через один) с проводами из нержавеющей стали. Затем скрутка формировалась до прямоугольного сечения. Изготовление таких элементов взял на себя ВНИИКП (В.Сытников) и, как всегда, оказавшись на высоте, изготовил для нас несколько вариантов таких элементов. Такая конструкция токонесущего элемента оказалась очень удачной находкой и, если в будущем нам придется заниматься подобными делами, то, я думаю, что основа, от которой отталкиваться для изготовления токонесущего элемента, у нас уже есть. Забегая вперед, скажу, что на испытаниях и у нас, и в Корее условия не позволяли точно измерять электрические потери, но, по оценкам, заметных кооперативных потерь не

было. Суммарные потери в этом токонесущем элементе с 20% точностью соответствовали потерям в одиночных проводах

Была также решена не очень простая проблема одновременного хорошего охлаждения проводников и хорошей электрической изоляции между витками и слоями. Были специально разработаны стеклопластиковые ткани, проницаемые для жидкого гелия и в то же время обеспечивающие надежную электрическую изоляцию.

Каждый накопитель был сделан в виде одиночной катушки диаметром около полуметра и помещен в металлический криостат, в стенках которого потери также были сведены до минимума. Было изготовлено два «интеллектуальных» и в то же время очень прочных криостата, которые успешно работали и у нас, и в Корее.

Все элементы накопителя были разработаны и изготовлены в Курчатовском институте.

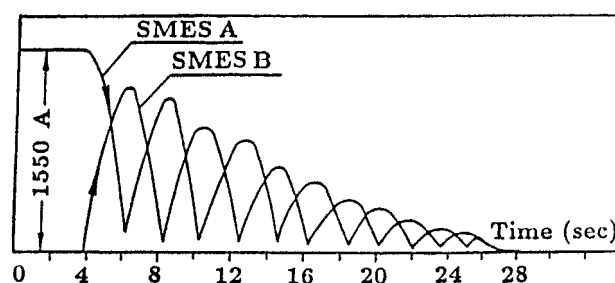


Рис. 2. Результат испытаний - обмен энергией между сверхпроводящими катушками за 2 сек.

После испытаний накопитель был отправлен в Корею, где мы участвовали в проведении испытаний, сами подвергаясь испытаниям жаркой погодой (конец июня – начало июля) в городе Чангвонг (на юге Кореи). Испытания проводили в Корейском электротехническом институте, в лаборатории, занимавшейся сверхпроводимостью. Для заказчиков это была новая работа, в области сверхпроводящих устройств они были тогда еще совсем «зеленые». Работа с этим накопителем стала для них хорошей школой, так что мы им еще дали, надеюсь, основательное образование. Я даже думаю, что вся эта работа была затеяна корейцами в немалой степени с тренировочно-учебными целями. Я должен сказать, что они этим воспользовались в полной мере, судя по успешным публикациям сотрудников этого корейского института, выходящим из года в год. Видно, что, в частности, и благодаря сотрудничеству с нами, корейские ученые заметно выросли, делают крупные амбициозные проекты по использованию сверхпроводимости в электроэнергетике.

Есть ли у них сейчас проекты накопителя, близкого к промышленному?

Не очень слежу за литературой, но думаю, что есть.

Как Вы относитесь к перспективе ВТСП накопителя?

Если говорить о перспективах ВТСП 1-го поколения, то сделать из них накопитель при температурах, близких к азотным, абсолютно нереально, потому что они не могут работать в высоких магнитных полях. Если говорить о 2-ом поколении ВТСП проводов, то необходимы основательные технико-экономические оценки, учитывающие стоимость материалов. НТСП относительно недороги, широко доступны и потенциал НТСП далеко не исчерпан.

ВТСП накопитель пока, к сожалению, не просматривается. А что касается НТСП, то можно говорить о возможности реализовать их с самыми разными запасенными энергиями для различных применений. Но, как мне кажется, для случая очень больших энергий встает вопрос о транспортабельности. Вряд ли можно делать накопитель на месте его будущей установки.

Я видел один из самых крупных - 100 МДж накопитель (диаметром метра 3), и его судьба, на мой взгляд, довольно печальна. Прошлой осенью он стоял в CAPS (Center of Advanced Power Systems), в шт. Флорида в недоделанном виде. Он слишком велик и дорогостоящ, чтобы на нем отрабатывать какие-либо технические решения, связанные с магнитной или преобразовательной технологией, и в тоже время не имеет конкретного применения. Тогда он стоял без криостата и покрывался пылью. Мне кажется, что нашим энергетикам при выборе этапов развития накопителей нужно как следует подумать. Накопитель небольшого масштаба можно было бы использовать для отработки тех же магнитов, преобразователей. Большой накопитель нужно делать для конкретных задач, которые оправдывали бы соответствующие немалые затраты.

Насколько перспективны передвижные накопители, например, для установки их в удаленных малодоступных районах для задач уничтожения накопленных токсичных материалов?

Я слышал о таких идеях, но они мне представляются мало перспективными. Накопитель при относительно малой запасенной энергии в короткие времена может очень быстро передавать большие мощности. Именно в этом его главное достоинство. А по плотности запасаемой энергии он не сравним, например, с аккумуляторной батареей или тем более с установками типа “дизель-генератор”. Здесь накопитель им уступает. Совсем другой случай, когда, например, на атомной электростанции в качестве аварийного источника энергии стоит “дизель-генератор”. При перебое с электроэнергией для его запуска, я думаю, потребуются десятки секунд, что катастрофично. Так вот на эти времена как раз и нужен накопитель, который включается практически мгновенно. Интересно также применение сверхпроводящих накопителей на электровозах

для рекуперации энергии (выдача ее при подъеме и накопление при спуске). Использовать накопитель разумных размеров и стоимости для долговременной выдачи энергии реально, но вряд ли целесообразно экономически.

ВТСП электрические машины для наземной и авиационной техники

Ожидается, что ВТСП электрические машины найдут широкое применение в наземных энергетических системах, высокоскоростном транспорте, аэрокосмической технике, в энергетических установках на морских судах. В общем объеме разрабатываемых ВТСП электроэнергетических устройств большая доля приходится именно на ВТСП электрические машины – с более высокими (по сравнению с традиционными электрическими машинами) величинами удельной мощности, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности. ВТСП электрические машины могут сыграть важную роль в водородной энергетике.



Рис. 1. Ротор крионасоса с ВТСП элементами

Загрязнение окружающей среды становится даже более острой проблемой, чем проблема ресурсов для питания источников энергии. Для ее решения ведущие в техническом отношении страны мира сосредоточили усилия на водородном топливе, продуктом сгорания которого является водяной пар. Компании США, Германии, Японии и России разработали концепции использования жидкого водорода (LH_2) в качестве топлива для авиационного и наземного транспорта. Реализация концепции требует развития инфраструктуры производства и передачи LH_2 . Одним из важных компонентов этой инфраструктуры являются криогенные насосы. Применение LH_2 в качестве топлива для автотранспортных средств потребует развития сети заправок станций, что приведет к применению криогенных электронасосов в широком сегменте рынка. Крионасос с ВТСП приводом для подачи криогенного топлива в авиационные и ракетно-космические двигатели разработан совместно учеными МАИ, ВНИИИМ и ОАО «Туполев» (рис. 2). Насос объе-

диняет реактивный четырехполюсный электродвигатель и центробежный криогенный насос и предназначен для системы подачи криогенного топлива. Ротор состоит из магнитомягкого сердечника и ВТСП элементов на основе *BSCCO/Ag* (рис.1).



Рис. 2. Крионасос с ВТСП приводом

Параметры разработанного крионасоса: вес – 16 кг, длина – 390 мм, внешний диаметр – 150 мм; выходная мощность насоса для различных скоростей вращения от 0,5 до 2,5 кг/см²

Современные ВТСП изготавливают в форме лент, объемных материалов и, в будущей перспективе, в виде проводов. Деформация ВТСП лент по радиусу больше чем 100 мм приводит к существенной деградации критических токов в них. Это накладывает ограничения на их использование в качестве обмоток за исключением очень больших систем. Поэтому ВТСП обмотки статоров рассматриваются как будущая перспектива.

В разработке крионасоса в роторах использованы объемные ВТСП элементы, работа которых основана на следующих явлениях в объемных ВТСП материалах:

- способность ВТСП элементов захватывать магнитный поток;
- гистерезисные явления в ВТСП в переменных магнитных полях;
- диамагнитное поведение ВТСП элементов в магнитном поле.

В соответствии с этим могут быть реализованы три типа синхронных ВТСП двигателей:

- машины с «захваченным магнитным полем»;
- гистерезисные двигатели;
- реактивные электродвигатели.

Электродвигатели с «захваченным магнитным полем» предпочтительны при номинальных мощностях более 1 МВт. Гистерезисные ВТСП двигатели обеспечивают постоянный вращающий момент, независимый от нагрузки, но коэффициент мощности таких двигателей довольно низок. Реактивные электродвигатели обладают большими эффективностью и коэффициентом мощности по сравнению с традиционными асинхронными двигателями. Пусковые характеристики обеспечиваются за счет ферромагнитных элементов ротора (асинхронный запуск). Авторы разработки остановились на варианте реактивного двигателя для привода криогенного насоса.

Применение ВТСП реактивного электропривода вместо асинхронного двигателя позволила уменьшить длину и удельный вес крионасоса, что является существенным для аэрокосмического оборудования. Экспериментально показано, что ВТСП крионасос обладает устойчивыми параметрами в широком диапазоне эксплуатационных скоростей.

К.Ковалев

ЗАРУБЕЖНЫЕ РАЗРАБОТКИ

На повестке дня – СПИНЫ: НТСП или ВТСП?

Энергетическая проблема становится все более острой и включает самые разные аспекты: новые источники энергии, резервное хранение энергии, стабильность линий электропередач, обслуживание электроэнергией критических производств, экологические аспекты. Развитые страны инвестируют в разработку новых источников энергии (водород, термоядерные реакторы) и новых энергетических систем все более крупные суммы. Формируется международное партнерство по исследованиям в области водородной энергетики, включающее уже 15 стран [1]. В ближайшие дни должен решиться вопрос о месте строительства самого крупного термоядерного реактора - прообраза термоядерной электростанции, создаваемого по международному проекту *ITER*. Термоядерная плазма в этом реакторе будет удерживаться гигантскими сверхпроводящими магнитами. Сверхпроводники могут раскрыть свой потенциал и при разработке других, не менее важных для энергетики компонентов энергосистем – линий электропередач, накопителей электроэнергии, токоограничителей, трансформаторов, генераторов.

В США при университете штата Флорида создан Центр перспективных энергетических систем (*CAPS* - Center for Advanced Power Systems) для проведения исследований в области энергетики и обучения студентов соответствующим специальностям [2]. Центр

CAPS возник на основе Национальной лаборатории сильных магнитных полей (National High Magnetic Field Laboratory, *NHML*). В настоящее время в г. Талахасси (шт. Флорида) строятся здания для выполнения новой программы по созданию и испытанию сверхпроводящих устройств. Этот комплекс зданий будет иметь офисы, помещения для исследовательской и учебной работы, а также вместительное здание, связанное с подстанцией местной электрической компании.

Значительное место в работе Центра будет отведено прикладной сверхпроводимости - исследование свойств сверхпроводящих материалов, разработка и испытание сверхпроводящих энергетических устройств (сверхпроводящих кабелей, трансформаторов, электрических машин и накопителей электроэнергии). Толчком к развитию сверхпроводящей энергетики послужило создание современных систем микрокриогенных охладителей, которые не используют жидких хладагентов и просты в обслуживании.

Ближайшая цель *CAPS* – создание и испытание сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии (СПИН, англ. - *SMES*). СПИН емкостью 100 МДж создает компания *BWX Technologies*, а затем он будет включен в испытательную сеть *CAPS*. Обмотка СПИНа изготовлена из заключенного в оболочку многожильного сверхпроводящего кабеля на основе сплава *NbTi*. Компания *BWX Technologies* занималась разработкой СПИНов в течение последних 8 лет при финансовой поддержке *DoE* (Министерство энергетики США), привлекая результаты исследований, проводимых в *EPRI* (Electric Power Research Institute). СПИН предназначен для создания резервных мощностей и стабилизации условий передачи электроэнергии.

Важно, что в *CAPS* имеется возможность продемонстрировать работу сверхпроводящего накопителя непосредственно в действующей энергосистеме, повышая ее устойчивость и увеличивая количество передаваемой энергии.

В *CAPS* в дополнение к уже готовому испытательному стенду планируют построить целую сверхпроводящую подстанцию, где, в частности, будут установлены трансформаторы с обмотками из ВТСП кабелей.

Chubu Electric Power Co. и Toshiba Corp. (обе – Япония) разрабатывают СПИН мощностью 5000 кВт, способный в течении одной секунды поддерживать напряжение в сети в случае его снижения и являющийся крупнейшим в мире [3]. Отличительная особенность этой системы - способность компенсировать снижение напряжения на *всех* единицах технологического оборудования завода одновременно, что невозможно достичь с помощью обычных источников бесперебойного питания (например, электронных преобразователей с аккумулятором). Время реакции на снижение напряжения

составляет 0,5 периода. Собственно магнитная система изготовлена из проводника *NbTi* резерфордовского типа. Надежность и простота технического обслуживания системы обеспечиваются тем, что и обмотка, и токовводы имеют отдельные рефрижераторы. Испытания, проведенные на заводе компании Sharp Corp., показали соответствие параметров собственно магнитной системы расчетным и ее способность компенсировать быстрое снижение напряжения в сети. Chubu Electric Power Co. и Toshiba Corp. приступили к созданию системы на 10000 кВт.

Табл. 1 Основные параметры СПИНа, разрабатываемого компанией *BWX Technologies*

| Параметр | Значение |
|--|------------|
| Номинальный ток, А | 4000 |
| Запасенная энергия (при токе 4000 А), МДж | 86 |
| Запасенная энергия (при токе 4300 А), МДж | 100 |
| Тип обмотки | "галетная" |
| Число галет | 88 |
| Число витков на слой (галету) | 20 |
| Общее число витков | 1760 |
| Индуктивность, Гн | 10,8 |
| Максимальное поле при номинальном токе, Тл | 4,03 |
| Число СП-жил в кабеле | 180 |
| Номинальный критический ток СП-жилы (при 4,2 К и 5Тл), А | 129 |
| Критическая плотность тока в жиле, А/мм ² | 2750 |
| Расход гелия, г/сек | 15 |

Эти же компании (Chubu Electric Power и Toshiba) совместно приступили к оценке возможности и разработке ВТСП СПИНа на основе проводников *Bi-2212* (6 многоволоконных композитов, скрученных вокруг никелевого центрального несущего элемента) с запасаемой энергией порядка МДж для компенсации мгновенных снижений напряжения [4]. Разработанный специально для этой системы ВТСП проводник отличается высокими характеристиками в полях от 10 Тл и выше, что позволяет существенно уменьшить размеры магнитной системы, и за счет этого увеличить толщину изоляции. Магнитная система сделана по принципу "галетной" обмотки, в первом варианте, состоящей из 4, а во втором из 11 одиночных обмоток. Нагрузка, на которой СПИН должен предотвращать снижение напряжения – это либо сопротивление 125 кВт, либо двигатель 50 кВт.

Так как проводники *Bi-2212* сохраняют сверхпроводящие свойства при более высоких температурах в сравнение с НТСП материалами, то это позволяет увеличить толщину изоляции и использовать вместо традиционных систем охлаждения микрокриогенные охладители (криокулеры).

Табл. 2 Основные параметры обмоток для ВТСП СПИНа (Chubu+Toshiba)

| | | |
|---------------------------|---|--|
| Параметры обмотки | Обмотка из 4 "галет", подготовленная к испытаниям | Соленоидальная обмотка, набранная из галет |
| Внутренний диаметр, м | 0.76 | 0.76 |
| Внешний диаметр, м | 1.40 | 1.40 |
| Высота, м | 0.67 | 0.127 |
| Число витков | 6x49x 20 | 6x49x4 |
| Номинальное напряжение, В | 2500 | 625 |
| Номинальный ток, А | 483 | 500 |
| Индуктивность, Гн | 8.56 | 0.72 |
| Запасенная энергия, МДж | 1,0 | 0,09 |

Табл. 3. Основные электрические параметры схемы с модельной обмоткой в качестве ВТСП СПИНа (Chubu+Toshiba)

| Оборудование | Параметр | Величина (характеристика) |
|---------------------------------------|---------------------------|---|
| Быстродействующий коммутатор | Переменное напряжение, кВ | 6,6 |
| | Переменный ток, А | 600 |
| Преобразователь (со стороны нагрузки) | Полупроводниковый элемент | Тиристор 6 кВ-2500А |
| | Постоянное напряжение | 625В |
| | Постоянный ток | 500 А |
| Сверхпроводящая катушка | Полупроводниковый элемент | Транзистор с усиленной инжекцией – 4,5кВ, 1500А |
| | Материал ВТСП кабеля | Bi-2212 |
| | Число обмоток | 4 |
| | Индуктивность, Гн | 0,72 |
| | Постоянное напряжение, В | 625 |
| | Постоянное напряжение, А | 500 |
| | Запасенная энергия, кДж | 90 |

Результаты испытаний системы с энергией 90 кДж, являющейся прототипом системы 1 МДж, показали соответствие напряжений номинальным значениям, а критический ток также оказался близок к номинальному значению. Испытания проводили в реальной схеме преобразователя с искусственным отключением питания и компенсацией снижения напряжения нагрузки. Все элементы схемы работали нормально. Испытания подтвердили возможность создания полномасштабной ВТСП системы.

Большая группа японских компаний (Kyusyu Electric Power, Chubu Electric Power, Hitachi, Toshiba), ряд университетов и институтов (University of Tokyo, Waseda University, Central Research Institute of Electric Power Industry) и исследовательский центр (International Superconductivity Technology Center) продолжают разработки СПИНов для нужд электроэнергетики а рамках специальной государственной программы [5]. В 1991-98 г.г. эта группа изготовила СПИН из низкотемпературных сверхпроводников мощностью 20 МВт и запасенной энергией 100 кВтч (то есть 360 МДж). В новом проекте создается два варианта конструкции для разных целей: первый предназначен для обеспечения устойчивой работы энергосистемы (его основные за-

данные параметры – мощность 100 МВт, запасенная энергия 15 кВтч), а второй - для компенсации флуктуаций нагрузки и стабилизации частоты в сети (мощность 100 МВт, запасенная энергия 500 кВтч). Обмотки магнитных систем и того, и другого варианта изготовлены из сверхпроводящего кабеля на основе сплава *NbTi* известной конструкции *CIC* (cable-in-conduit) размером 19,2 x 19,2 мм с внутренним каналом для прокачки жидкого гелия. Эта группа разработчиков также изучала возможность создания конструкции ВТСП магнита уменьшенных габаритов и высоким полем с оптимизированной стоимостью. Исследуется многообмоточная магнитная система из трех модулей, содержащих по 4 обмотки, помещенных каждый в отдельный криостат. Для уменьшения полей рассеяния обмотки располагали таким образом, чтобы создаваемые ими магнитные моменты были направлены в противоположные стороны. Для проверки работоспособности конструкции изготовлены и испытаны модельные обмотки. Для первой магнитной системы изготовлена только одна модельная обмотка, а для второй – 4. Полномасштабные системы пока не изготовлены. На испытаниях первой магнитной

системы был достигнут максимальный ток 9,6 кА (5,66 Тл), а для второй - 10 кА (4,8 Тл).

Теоретически изучена возможность создания обмоток СПИНа из висмутовых ВТСП проводников (*Bi-2212* и *Bi-2223*) для работы при температурах в пределах от 10 до 50 К. ВТСП проводник *Bi-2212* из-за низких критических токов крайне затруднительно использовать при 50 К, однако, при 10 К и, тем более, при 4,2 К он может конкурировать с низкотемпературным сверхпроводником за счет больших величин критических токов при этих температурах. Проводник *Bi-2223* вполне работоспособен при 50 К, однако в отличие от *Bi-2212*, он обладает сложной зависимостью критической плотности тока от ориентации магнитного поля, что определяет сложную конфигурацию обмоток.

В настоящее время эта группа компаний работает над созданием полномасштабных многообмоточных систем СПИНа.

Н.Балашов

1. <http://www.usea.org/DOE%20Hydrogen%20Roadmap.pdf>
2. *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, 2003, **13**, No. 2
3. <http://www.chem.t.u-tokyo.ac.jp/appchem/labs/kitazawa/SUPERCOM/contents-e.html>
4. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2004, **14**, 770
5. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2004, **14**, 693

РОССИЙСКИЕ НАУЧНЫЕ ЦЕНТРЫ

ВТСП второго поколения:

Россия в ожидании инвесторов

Путь к высокой технологии всегда начинается с фундаментального результата. Этот неоспоримый факт подтвержден и в случае разработок ВТСП проводников второго поколения (*2G*) зарубежными фирмами - патентами на основополагающие технологии владеют университеты и исследовательские лаборатории, а промышленные фирмы выступают, как потребители соответствующих лицензий. В США, Китае, Японии, Германии университеты – равноправные участники разработок в области

высоких технологий, в частности, в разработке *2G* ВТСП. Именно так, нарабатывая огромный фундаментальный багаж, в России включилась в разработку *2G* ВТСП технологии научная группа под руководством проф. А.Р. Кауля (кафедра неорганической химии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующий кафедрой – акад. РАН Ю.Д.Третьяков).

Эта группа имеет многолетний опыт синтеза и исследования разнообразных функциональных тонкопленочных и объемных материалов на основе сложных оксидов. За последние десять лет ей (в сотрудничестве с коллегами-физиками) проведены многосторонние исследования эпитаксиальных пленок оксидов, родственных перовскиту, включая сверхпроводящие купраты, манганиты с колоссальным магнетосопротивлением (КМС), сегнетоэлектрики (титанаты *Ba*, *Sr* и *Pb*; *KNbO₃*), никелаты, кобальтиты РЗЭ и рутенаты с металлической проводимостью.

Все эти материалы были получены с использованием метода химического осаждения из паровой фазы (*MOCVD*). Наряду с перовскитами изучаются соединения со структурами шпинели, граната и флюорита, преимущественно в аспекте получения их в виде тонких пленок и взаимосвязи реальной структуры пленок с их функциональными свойствами. В последние годы были достигнуты серьезные успехи в получении слоистых тонкопленочных гетероструктур, сочетающих в себе различные по составу и структуре функциональные слои (например, ВТСП/манганит с КМС, магнитная шпинель/манганит с КМС, проводящий никелат (кобальтит)/сегнетоэлектрик и т.д.). Изучены эпитаксиальные соотношения слоев в названных и подобных им гетероструктурах, способы аккомодации напряжений в пленках, возникающих при неполном соответствии параметров пленок и подложек, доменная и дислокационная структура, химическое взаимодействие на границе между эпитаксиальными слоями. Больших успехов группа добилась развивая практику эпитаксиальной стабилизации неустойчивых оксидных фаз и концепцию образования нанодоменных вариантных структур в эпитаксиальных пленках [1]. В тесном взаимодействии с коллегами из России и других стран (Германии, Франции, Испании, Швеции и Нидерландов) изучены электрические, магнитные и магнитооптические свойства полученных пленок и гетероструктур. Созданы прототипы тонкопленочных устройств.

Неудивительно, что появление в 1997 году первых сообщений о ВТСП кабелях второго поколения (*2G* ВТСП кабели) на основе пленок *YBa₂Cu₃O_{7-y}*, нанесенных на защищенные оксидным буфером биаксиально текстурированные ленты из никелевых сплавов, было с большим интересом воспринято в этой научной группе. При этом практически сразу родилась оригинальная концепция изготовления *2G* ВТСП кабелей в рамках одного технологического цикла, основанного на методе *MOCVD*.

Смелость этого замысла состояла в том, что, как правило, методы осаждения пленок, идеально подходящие для получения эпитаксиальных пленок *YBa₂Cu₃O_{7-y}*, не работают столь же хорошо при получении оксидных буферных слоев, разделяющих слой ВТСП и металлическую ленту. Неудивительно – ведь при этом, в отличие от окислительной атмосферы, используемой для получения ВТСП, требуются восстановительные условия, исключающие поверхностное окисление *Ni*-сплава: парциальное

давление кислорода в условиях осаждения не должно превышать 10^{-13} - 10^{-15} атм при 700-800°C.

Напротив, одним из достоинств метода *MOCVD* является технологическая гибкость: условия нанесения пленок легко могут варьироваться или настраиваться на определенный диапазон парциальных давлений кислорода (в зависимости от стабильности тех или иных оксидных фаз) при изменении соотношения реакционных газов (O_2 , H_2O , H_2 , NH_3 и ряда других), без каких-либо изменений в аппаратурном оформлении процесса. Это открывает принципиальную возможность осаждать буферный слой и слой ВТСП в едином технологическом цикле, что необходимо для достижения высокой производительности процесса изготовления 2G ВТСП кабелей.

Сущность метода *MOCVD* состоит в том, что пары летучих металлоорганических соединений в заданном соотношении транспортируются потоком инертного газа-носителя в реактор, где на поверхности подложки под одновременным действием реакционных газов и термического возбуждения происходит их превращение в неорганические соединения (какие именно, зависит от выбора реакционных газов). Процесс *MOCVD* характеризуется высокой технологичностью: не требуется создания высокого вакуума в реакторе, нет необходимости в использовании дорогостоящей аппаратуры, не нужна предварительная подготовка мишеней – целевой состав покрытия можно изменить в любой момент за счет изменения состава паровой фазы. Оппоненты метода *MOCVD* обычно указывают на высокую стоимость летучих металлоорганических соединений (как правило, бэта-дикетонатов металлов), однако при больших объемах производства цена летучих прекурсоров должна радикально снизиться, тем более, что наиболее популярные сейчас сложные дивалоилметанаты металлов могут быть в перспективе заменены на более дешевые соединения. Поэтому, современный уровень цен на летучие прекурсоры, как на вещества для научных исследований, не должен рассматриваться как существенное ограничение технологии *MOCVD* при масштабировании в будущем.

Существенно, что спектр оксидных материалов, которые могут быть использованы в качестве буфера, разделяющего металлическую ленту и слой $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ значительно расширяется. Так, в группе МГУ показано, что кроме уже хорошо изученных буферов на основе CeO_2 , ZrO_2 и оксидов РЗЭ со структурой флюорита, непосредственно на поверхности никеля возможен эпитаксиальный рост перовскитов с металлической проводимостью, обеспечивающих в дальнейшем электрический контакт $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ и металлической основой кабеля. Последнее весьма важно для электрической стабили-

зации кабеля в случае локального выхода $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ из сверхпроводящего состояния.

Увы, в конце 90-х общий интерес к ВТСП снижался и получить необходимое финансирование под эти исследования в нашей стране не удалось. Надо сказать, что исследователи из МГУ не стояли на месте: ими были проведены важные подготовительные эксперименты по химической совместимости слоев, по кинетике рекристаллизации поверхности никелевых лент в различных атмосферах и эпитаксии перовскитов в восстановительных условиях [2,3], установлено прочное сотрудничество с Институтом физики металлов УрО РАН, где профессором Д.П. Родионовым одновременно были изучены закономерности образования кубической текстуры Ni -сплавов при их прокатке [4]. Однако, строительство технологической линии для непрерывного нанесения эпитаксиальных функциональных слоев на бегущую ленту металлического сплава оказалось слишком дорогой задачей.

В этих условиях важным стало наличие единомышленников и надежных партнеров за рубежом, которые также поверили в возможности технологии *MOCVD* для изготовления 2G ВТСП. Такие работы успешно развиваются, например, в Хьюстонском центре сверхпроводимости (США) и в Техническом университете Брауншвейга (ФРГ). В обоих случаях эти научные исследования дошли до стадии “отпочкования” частных компаний, рассчитывающих на коммерциализацию конечного продукта – 2G ВТСП кабелей. Следует отметить, что в обоих случаях существенный вклад в успех внесли молодые российские ученые, выпускники МГУ, бывшие аспиранты лаборатории проф. А.Р. Кауля, которые активно используют знания процесса *MOCVD*, приобретенные в Alma Mater. Совместные разработки лаборатории химии координационных соединений МГУ и ТУ Брауншвейг защищены патентом.

Бурный успех технологии лент 2G ВТСП за последние два года, и, прежде всего, впечатляющий рост длины лент, на которых реализованы величины транспортного тока, уверенно перешагнувшие через рубеж 100 А на 1 см ширины ленты, привели к всплеску коммерческого интереса к этим материалам в ведущих странах (США, Япония, ФРГ). Перспективность этого направления стала в последнее время понятной для значительно более широкого круга исследователей, а также заинтересованных бизнесменов и инвесторов.

В текущем году Федеральное агентство по науке и инновациям России в рамках Программы по приоритетному направлению «Индустрия наносистем и материалов» впервые в нашей стране объявило о начале финансирования работ по теме “Разработка перспективных технологий получения ВТСП материалов второго поколения”. Выделяемые (пока!) финансы явно недостаточны для полномасштабного

освоения технологии 2G ВТСП кабелей, но, надо полагать, важность этой проблемы убедит государственных и частных инвесторов в необходимости “раскошелиться”.

Лаборатория под руководством проф. А.Р. Кауля готова включиться в эту работу и открыта к сотрудничеству с другими научными группами, способными внести свой вклад в развитие технологии 2G ВТСП лент.

О.Горбенко

Читайте по теме:

1. А.Р. Кауль, О.Ю. Горбенко, А.А. Каменев. “Роль гетероэпитаксии в разработке новых тонкопленочных функциональных материалов на основе оксидов”. Успехи химии 2004, **73**, 932

2. O. Stadel, J. Schmidt, M. Liekefett, G.Wahl, O.Yu. Gorbenko, and A. R. Kaul. MOCVD Techniques for the Production of Coated Conductors. IEEE Trans. Appl. Superconductivity 2003, **13**, 2528

3. O. Yu. Gorbenko, O. Stadel, G. Wahl, A. R. Kaul. MOCVD of LaMnO₃ on Biaxially Textured Ni-based Substrates in a Reducing Atmosphere. Chem. Vapor Deposition 2004, **10**, 109

4. Счастливец В.М., Устинов В.В., Родионов Д.П., Соколов Б.К., Гервасьева И.В., Носов А.П., Сазонова В.А., Васильев В.Г., Владимирова Е.В. Эпитаксиальные подложки из сплавов никеля с острой кубической текстурой для ленточных высокотемпературных сверхпроводников. ДАН 2004, **395**, 339

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОРПОРАЦИИ

Китай. Специализированные ВТСП фирмы - Innopower, Innova



Установленный в Китае BSCCO сверхпроводящий кабель

В Китае созданы 2 специализированных фирмы по разработке и производству ВТСП проводников для электроэнергетики - Innopower Superconductor Cable Co. и Innova Superconductor Technology Co. Кроме того, в работу включились ведущие электротехнические (Shanghai Cable Works, Baoding Tianwei Group Company Ltd; Tebian Electric Apparatus Stock

Co.) и сетевые компании (Yunnan Electric Power Group; State Grid).

Innopower Superconductor Cable Co., Ltd. (Пекин) (<http://www.innopower.com/english/company.htm>)

является первой китайской фирмой, созданной специально для разработки и производства ВТСП кабелей для электротехнических и других применений. Первое изделие фирмы – ВТСП силовой кабель (диаметр 112 мм, длина 30 м, 3 фазы, 35 кВ/2 кА), установленный в марте 2004 года на действующей Pujі подстанции локальной сети China Southern Power Grid (Kunming, провинция Юннань).

Прежде чем создать действующую систему, Innopower выполнила серию экспериментов по исследованию различных аспектов конструирования и производства кабеля, включая углы намотки провода, конфигурацию слоев Bi-2223 лент, механизмы охлаждения жидким азотом, структуру и конфигурацию электрических выводов, методы изготовления. Затем был изготовлен и испытан 4 м ВТСП кабель и электрический подводы к нему.

Табл. 1. Финансирование проекта по разработке и установке в действующую сеть 30 м ВТСП кабеля

| Компания или Ведомство | Объем финансирования, млн. долл. |
|---|----------------------------------|
| Министерство науки и технологии | 0,890 |
| Муниципалитет Пекина | 1,0 |
| Правительство провинции Юннань | 0,22 |
| Сетевая компания Yunnan Electric Power Group, Co.(YEPG) | 2,17 |
| Итого | 4,2 |

ВТСП провод для кабеля был разработан совместно Innova Superconductor Technology Co., Ltd. и Центром по прикладной сверхпроводимости при университете Синьхуа (Tsinghua Univ.). Innova изготовила многожильный провод 1-го поколения на основе Bi-2223 - плотность инженерного критического тока (J_c) 8500А/см² (77К, собственное поле), критический ток (I_c) 85 А (77 К, собственное поле), максимальная механическая нагрузка 100 МПа (при 5% деградации I_c), минимальный радиус скручивания 30 мм (при 5% деградации I_c). Innova утверждает, что потенциал ее производства - 200 км ВТСП провода в год - может быть утроен.

Намотку провода и сборку кабеля осуществляли на заводе Shanghai Cable Works. Проблема электрических контактов к кабелю была решена Институтом физики плазмы Китайской академии наук.

Криостатирование кабеля обеспечила немецкая фирма Nexans, с которой Innopower имеет соглашение о сотрудничестве в разработке технологии ВТСП кабелей. Криогенная муфта состоит из двух гибких концентрических труб из нержавеющей стали.

Внешняя часть внутренней трубы покрыта слоем суперизоляции. Специальный разделитель с низкими тепловыми потерями предотвращает контакт между внешней и внутренней трубой. Длительный вакуум обеспечивают молекулярные сита.

Конструирование и сборку криогенной системы осуществила China Electronics Technology Corporation – рефрижераторная система замкнутого цикла на жидком азоте имеет хладопроизводительность 2000 Вт при 75 К при скорости прокачки жидкого азота 600-900 л/час.

Важнейшую роль в успехе эксперимента сыграла сетевая компания Yunnan Electric Power Group (YEPG), которая установила кабель в своей локальной сети - China Southern Power Grid (Kunming, провинция Юннань). YEPG подготовила участок

для включения кабеля в общую сеть и всю необходимую инфраструктуру для работы кабеля, включая станцию рефрижерации и специальный коридор для прокладки ВТСП кабеля. YEPG также участвовала в проведении испытаний и теперь взяла на себя полную ответственность за обеспечение постоянного функционирования кабеля в сети. Работа кабеля обеспечивается рабочими станциями. Весь мониторинг (система контроля механической и электрической части) обеспечивает автоматическая система, разработанная Хуажонгским университетом науки и технологии. Три раза в день рабочие станции осуществляют также визуальный контроль этого участка сети.

Таблица 2. Соисполнители проекта по установке в действующую сеть 30 м ВТСП кабеля

| Компания или Исследовательский центр | Участие в разработке и установке ВТСП кабеля в действующую сеть |
|---|--|
| Innova Superconductor Technology Co. Tsinghua Univ. | Разработка ВТСП проводника для кабеля |
| Innova Superconductor Technology Co. | Изготовление многожильного провода 1-го поколения - Bi-2223 |
| Shanghai Cable Works | Намотка кабеля |
| Plasma Physics Institute, Hefei | Разработка электрических контактов к кабелю |
| Nexans, Германия | Криостатирование кабеля |
| China Electronics Technology Corp. | Конструирование и сборка криогенной системы |
| Yunnan Electric Power Group. | Создание инфраструктуры, включая станцию рефрижерации и специальный коридор для прокладки ВТСП кабеля. |
| Hangzhon University | Автоматизированная система мониторинга ВТСП участка в сети |

В настоящее время Innpower работает по заказу State Grid, Co. и Министерства науки и технологий Китая над разработкой 300-400 м ВТСП линии электропередач. Проект стартует с 2005 г. и завершится в 2008 г. Как и в случае с YEPG, сетевая компания State Grid, Co. будет участвовать в финансировании работ. Детали проекта и его финансовое обеспечение пока в стадии обсуждения. Innpower исследует возможности коммерческого применения ВТСП кабелей в сетях с большой пропускной способностью для металлургических заводов. На фирме также дан старт разработке ВТСП токоограничителя.

Innova Superconductor Technology Co., Ltd. (Пекин) создана в сентябре 2000 года. Основное поле деятельности компании – технологии, связанные с ВТСП сверхпроводниками. По такому параметру, как длина одножильного ВТСП проводника, компания держит мировой рекорд. Общая цель компаний в мире, занятых производством ВТСП провода, - достичь производства объемом 1000 км и удваивать этот объем каждый год. На сегодняшний день в мире произведено 700 км ВТСП провода.

Другие крупные электроэнергетические фирмы в Китае, включившиеся в сверхпроводниковую технологию, - Baoding Tianwei Group Company Ltd (разработка сверхпроводящих индуктивных накопителей – SMES) и Tebian Electric Apparatus Stock Co Ltd (разработка 3-фазного 26 кВА ВТСП трансформатора - <http://www.tbea.com.cn/english/>)

Различные исследования в области сверхпроводимости и, в частности, связанные с электротехническими разработками, активно проводятся также в 25 университетах и исследовательских институтах Китая. Среди них наиболее активны - Beijing Univ Aeronautics Astronautics (YBCO ленты, MgB₂ провода), China Univ. Science Technology, General Research Inst Non-Ferrous Metals, Hefei Research Inst Cryogenics Electronics (ВТСП кабель), Huazhong Univ Science, Inst Electrical Engineering Chinese Academy Sciences (ВТСП трансформатор), Inst. Plasma Physics Chinese Academy Sciences (ВТСП кабель), Inst Solid State Physics Chinese Academy Science, Tsinghua Univ, Zhejiang Univ.

С.Корецкая

Работы по длинномерным ВТСП в Японии

Использованные в тексте сокращения

IBAD - ion beam assisted deposition (ионно-лучевое осаждение)

ISD – inclined-substrate deposition (осаждение на наклонную подложку)

MOCVD - metal organic chemical vapor deposition (химическое паровое осаждение из металло-органических соединений)

MOD – metal organic deposition (жидкостное осаждение из органических соединений)

PLD - pulsed laser deposition (импульсное лазерное осаждение)

SOE - surface-oxidation epitaxy (эпитаксия путем окисления поверхности)

TFA – trifluoroacetate (трифторацетат)

Япония приступила к разработке ВТСП проводов еще в конце 80-х, но значительно увеличила их интенсивность с 1998 г., когда стала очевидной возможность достижения практических целей, и в Японии была сформирована национальная программа.

В рамках правительственного ведомства Японии *NEDO* (New Energy and Industrial Technology Development Organization) организован проект – “Исследования и развитие фундаментальных технологий для применения сверхпроводимости на практике” (Fundamental Superconducting Technologies Development Project). Цель проекта – создание 2G ленты, несущей ток 200 А при длине 200 м (2005 год) и 300 А при длине 500 м (2006 год). Главной исполнительницей проекта - Лаборатория исследований по сверхпроводимости (*SRL*) при Международном центре сверхпроводниковых технологий (*ISTEC*) в Цукубо (к слову, директор этой лаборатории – первооткрыватель ВТСП *Bi*-системы, Shoji Tanaka). В рамках этой программы первый пятилетний этап завершился в марте 2003 г. получением ряда впечатляющих результатов. В частности, удалось получить 46-метровую ВТСП ленту (буферный слой, нанесенный по технологии *IBAD*, + слой сверхпроводника, нанесенный методом *PLD*) с токонесущей способностью 78 А (ф. Fujikura) и достигнут ток 221 А на коротких отрезках с толсто пленочным покрытием (*SRL* методом *MOD* из фторацетатных прекурсоров).

Высокие результаты получены также и совместными усилиями фирм Furukawa Co.Ltd., Showa Wire&Cable Co.Ltd., Sumimoto Electric Industries и исследовательского центра Japan Fine Ceramics Center (*JFCC*), использовавшими прием *MOD* нанесения буферных слоев на наклонные текстурированные подложки (*ISD*).

С мая 2003 г. начался второй пятилетний этап работ по упомянутой выше национальной программе, в котором предполагалось создание к концу 2004 г. установок для крупномасштабного производства ВТСП-лент.

Сегодня разработки ведутся в двух направлениях.

1. *Получение высококачественных длинномерных лент.* Конечная цель – развитие устойчивого производства ВТСП лент длиной до 500 м при скорости производства до 5 м/час с токонесущей способностью до 300 А на см ширины (77 К, в собственном поле) и до 30 А на см ширины (77 К, в поле 3 Тл). При этом их стоимость не должна превысить единиц долл./кА·м. Ответственные за успешное достижение поставленных целей - *SRL* и Fujikura.

Последние достижения по этому направлению таковы. Fujikura изготовила ленту длиной 100 м ($I_c=38$ А, $J_c=0,76$ МА/см²). При этом буферный слой *Zr₂Gd₂O₇* был нанесен по технологии *IBAD* (скорость нанесения 0,5 м/час), а сверхпроводящий слой *YBCO* – методом *PLD* (1 м/час). Улучшение текстуры пленки за счет нанесения на буферный слой подслоя *CeO₂* позволило повысить величину критического тока до 1,6 МА/см², но в отрезке длиной 40 м. На коротких образцах исследователям *SRL* и Nagoya Coated Conductor Centre удалось в аналогичном исполнении ленты получить $J_c=4,4$ МА/см², а $I_c=300$ А.

2. *Производство дешевых длинномерных лент.* Поскольку перед программой стоит задача диверсификации выпускаемой продукции – для различных конкретных применений должна выпускаться лента с необходимыми именно для этого применения свойствами. Это должно позволить находить в ряде случаев разумный компромисс между стоимостью и эксплуатационными параметрами.

За основу взята технология *RABITS*, поскольку производство текстурированных металлических лент – просто и дешево, а используемые технологии нанесения сверхпроводящих слоев (*MOD* и *MOCVD*) не требуют дорогостоящего оборудования (в первую очередь систем вакуумирования) и достаточно производительны. Параллельно ведутся как работы по технологии *MOD* (*SRL* и Showa), так и по технологии *MOCVD* (Chubu Electric Power Company в сотрудничестве с Fujikura). Совершенствуя состав трифторацетатных прекурсоров, сотрудники *SRL* существенно ускорили процесс *MOD* нанесения сверхпроводящих покрытий и получили для 25-сантиметровой ленты токи до 210 А (плотность критического тока, $J_c=10^5$ А/см²). Команда *SRL* +

Showa научилась с высокой скоростью изготавливать 100 м ленты, однако их транспортные характеристики пока невысоки, поскольку слой сверхпроводника наносили на нетекстурированную серебряную ленту. В связи с этим команда интенсивно разрабатывает другие материалы для текстурированных подложек и разнообразит составы буферных слоев (так, использование в качестве буферного слоя оксидов системы $CeO_2-Gd_2O_3$ позволило избежать образования трещин).

Что касается технологии *MOCVD*, то на сегодня Chubu Electric Power Company на коротких образцах ленты $Y123(MOCVD)/CeO_2(MOCVD)/Zr_2Gd_2O_7(IBAD)/Hastelloy$ достигла $J_c(77K)=2$ MA/cm², а на ленте длиной 1 м - токов более 40 А.

Sumimoto Electric Industries разрабатывает технологию двустороннего нанесения сверхпроводящих покрытий металлических лент методом *PLD*. Хотя этот метод – дорогой, ожидается что именно за счет двустороннего нанесения стоимость лент удастся снизить до единиц долл./кА·м (к слову, по оценкам американских исследователей возможно снижение цены *2G* провода до 0,01 долл./А·м)

Кроме упомянутых выше команд, работы по программе ведут университетские лаборатории (в частности, в Kyushu Univ., Yokohama National Univ.). Их цель – поддержка команд-разработчиков фундаментальными результатами, способными обеспечить быстрый прогресс в обоих технологических направлениях, например путем

а) обеспечения непрерывного контроля токонесущей способности, распределения электромагнитных характеристик (J_c , B , T) по длине ленты, микроструктуры, термической стабильности, механических свойств;

б) совершенствования сверхпроводящего материала как такового (условия термической обработки, создание центров пиннинга, совершенствование границ зерен).

Ю.Метлин

1. *Physica C* 2004, **412-414**, 1

КОНКУРСЫ

Роснаука дает шанс ВТСП

В новых конкурсах, объявленных Роснаукой на 2005-2006 г.г., представлены два задания для сверхпроводников.

В рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы по приоритетному направлению «Индустрия наносистем и материалов» в подразделе «Технология создания и обработки кристаллических материалов со специальными свойствами» раздела «Индустрия наносистем» выставлен лот «Разработка перспективных технологий получения ВТСП материалов второго поколения». Цель проекта - внедрение нанотехнологий в произ-

водство технических высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) нового поколения.

В результате разработки необходимо

- получить металлические протяженные подложки с улучшенным качеством поверхности;
- разработать нанотехнологический метод нанесения буферных слоев и ВТСП покрытий толщиной несколько нанометров на протяженные металлические подложки;
- изучить взаимосвязь электродинамических характеристик и тонкой структуры ВТСП нанопокровов.

Лимит бюджетного финансирования - **всего – 10,0 млн. руб., в том числе на 2005 год – 5,0 млн. руб.**

В рамках этой же ФЦНТП по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение» (II очередь) выставлен Лот ЭЭ.22.5/001 - Разработка электрооборудования с использованием технологии высокотемпературной сверхпроводимости.

Цель проекта - Разработка, создание опытных образцов электрооборудования с использованием технологии высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и проведение комплексных испытаний с целью обеспечения существенной экономии ресурсов.

В результате применения новых технологий должен быть разработан полномасштабный образец электрооборудования с использованием ВТСП- технологий.

Лимит бюджетного финансирования: **всего – 20,0 млн. рублей., в том числе на 2005 год – 10 млн. рублей.**

Кроме того, из внебюджетных источников должно быть привлечено 8,0 млн. рублей, в том числе на 2005 год - 3,0 млн. рублей.

Играть в догонялки за ведущими странами – много-трудная задача, но россиянам – привычно (не впервой!). Пожелаем тем, кто выиграет эти лоты – крупного успеха!

- <http://www.goszakupki.ru>
- <http://www.fasi.gov.ru>

ТОРЖЕСТВА

Николай Алексеевич Черноплеков (член.-корр. РАН, научный руководитель ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт») в свое время был одним из активных участников крупной (еще советской) разработки промышленного производства длинномерных НТСП проводников на основе $NbTi$ и станида ниобия – Nb_3Sn . Разработки Nb_3Sn проводников были пионерскими. В сегодняшних терминах Nb_3Sn проводники можно назвать НТСП проводниками 2-го поколения (если 1-ым поколением считать НТСП $NbTi$ проводники). Успех этих разработок лег в основу создания широкого спектра сверхпроводниковых магнитных систем различного назначения и определил лидирующее положение нашей страны, наряду с США, в области прикладной сверхпроводимости. Наиболее

интересные разработки - сверхпроводниковые магнитные системы для токамаков - Т-7 на основе $NbTi$ (первого сверхпроводникового токамака в мире) и Т-15 – самого крупного токамака на основе Nb_3Sn . Успех российских токамаков определил возможность создания Международного проекта экспериментального термоядерного реактора (*ITER*) и участия в нем российских ученых. В свой славный юбилей 6 марта с.г. Николай Алексеевич по-прежнему остается в строю, принимая активное участие в продвижении ВТСП технологий. Пожелаем ему сохранить здоровье, неиссякаемый энтузиазм и высокий дух российского интеллигента, столь дефицитный в наш новый рыночный век.

Сегодня на повестке дня в мире – уже ВТСП проводники 2-го поколения. Важные фундаментальные результаты по технологии этих материалов получил

еще один мартовский (12 марта) юбилей – проф. Андрей Рафаилович Кауль (руководитель Лаборатории на химическом факультете МГУ). Высокая научная интуиция сочетается в нем с тщательностью и глубиной проводимых исследований. Именно интуиция подсказала ему важность занятия *MOCVD* технологией ВТСП покрытий, а основательность многолетних исследований сделала незаменимым специалистом в этой неожиданно ставшей наиболее актуальной для промышленного внедрения технологии ВТСП 2-го поколения. Пожелаем ему (а заодно и России!) только победы в мировой схватке за первенство в коммерческих ВТСП проводниках.

К сему, в юбилейный год пожелаем обоим юбилярам участвовать и ВЫИГРАТЬ конкурс Роснауки!

Стратегическая партнерская инициатива (SPI) США для электроэнергетических применений

| Промышленные участники программы | Основные цели |
|--|--|
| Waukesha Transformer | Разработать и испытать 5/10 МВА прототипа ВТСП трансформатора. Масштабировать ВТСП трансформатор до 30/60 МВА. |
| SuperPower Fault Current Limiter | Разработать и испытать ВТСП матричный токоограничитель для передающих сетей на 138 кВ. |
| Niagara Mohawk Distribution Cable | Разработать и установить 350 м, 48 МВА ВТСП кабель в сеть распределения напряжения (34,5 кВ, 800 А) между двумя подстанциями в Алабаме, округ Нью-Йорк. |
| Southwire Distribution Cable | Разработать и поддерживать в действии в течение нескольких лет 27 МВт, 300 м, 3-х фазный распределительный ВТСП кабель, снабжающий электропитанием 3 завода. |
| American Electric Power Triaxial Cable | Разработать и установить 3-х фазный, 200 м, 69 МВт (13,2 кВ, 3,0 кА) трехосный ВТСП кабель на подстанции American Electric Power (<i>AEP</i>) в шт. Огайо. |
| Long Island Power Authority (<i>LIPA</i>) Transmission Cable | Разработать и установить 3-х фазный, 610 м, 600 МВт кабель для передачи напряжения (138 кВ, 2400 А) между двумя подстанциями на Лонг-Айленде, в округе Нью-Йорка. |
| Boeing Flywheel Electricity Systems | Разработать 10 кВтч/3кВт высокоэффективную маховую электрическую систему (<i>FES</i>), использующую ВТСП подшипники. Масштабировать 5 кВтч/100 кВт маховую электрическую систему до 30 кВтч для электросетей повышенного качества. |
| General Electric Generators | Разработать 1,5 МВт и 100 МВт ВТСП генератор. |

Издатель ООО НИЦ «НЕОТОН»

(при поддержке ОАО «ФСК ЕЭС»)

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

Редактор

С.С. Иванов ssi@iht.mpei.ac.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *С.Т. Корецкая* stk@issp.ras.ru (095) 930 3389;

А.К. Чернышова chak@newmail.ru (095) 196 7200;

Н.Н. Балашов, О.Горбенко, К.Л. Ковалев, Ю.Г. Метлин

Верстка *И.Л. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Ю.К. Мухин*