

# СВЕРХПРОВОДНИКИ

## для электроэнергетики

Том 2 выпуск 3  
Июнь 2005

Исследовательские центры  
Провода Кабели  
Трансформаторы

Фирмы  
Генераторы  
Токоограничители

Инвесторы  
Накопители

### РЕКОРДЫ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

**1400 А - транспортный ток в многослойной ленте** (6 параллельных слоев  $YBCO-CeO_2$ ) длиной 1 см (Los Alamos Nat. Lab.)

Медленно, но верно технология 2G совершенствуется. Существенный прогресс был достигнут с введением примесных наночастиц, оказавшихся эффективными центрами пиннинга, что позволило сохранить высокие токи в магнитных полях. Казалось бы, токонесущую способность пленочных проводников можно увеличить простым увеличением толщины пленки. Эксперименты, однако, показали обратное – токонесущая способность падала. Возможная причина – с ростом толщины увеличивается разориентация зерен. Выход нашли сотрудники Los Alamos Nat. Lab., прославившая сверхпроводящую  $YBCO$  пленку буферными слоями  $CeO_2$ . В результате в шестислойке они получили рекордный ток 1400 А, правда, пока (на этапе апробации идеи) в проводнике длиной 1 см. Теперь специализированные компании возьмутся за доведение идеи до технологии, и можно ждать новых рекордов.

1. *Science* 2005, 308, p. 348

### Оптимальная толщина ВТСП слоя в 2G

В совместной работе [1] сотрудников Политехнического института в Турине и компании EDISON (Италия) показано, что максимальная плотность критического тока достигается на пленках, имеющих толщину, вдвое большую глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Эксперименты проведены на  $c$ -ориентированных тонких пленках  $YBCO$ , осажденных методом термического соиспарения на подложку стабилизированного итрием двуоксида циркония ( $YSZ$ ) с буферным подслоем  $CeO_2$  толщиной 40 нм. Образцы имели разную толщину, но были идентичны по микроструктуре и плотности центров пиннинга. Исследования в атомно-силовом микроскопе подтвердили нарастающую дефектность поверхности ВТСП пленки при толщине больше 400 нм. Максимальная плотность критического тока получена при толщине 300 нм (это как раз  $2\lambda$  для  $YBCO$  при низкой температуре).

1. *Physica C*, 2005, 404, 220

И далее...

*Nature* повторяется...

### РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

*Можно ли вернуть утраченное лидерство за 300 тыс. долл.?* .....2

### ВТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

*AMSC. Очередной шаг к снижению стоимости ВТСП лент*.....6

*AMSC изготовит ~50 км ВТСП ленты для Ultera* ..... 6

*Достижения японских компаний на конец 2004 года*.....7

*ВТСП проводам предстоит одолеть летаргию сетевых компаний*.....7

### ВТСП УСТРОЙСТВА В ДЕЙСТВИИ

*Компания Conduflex построит подземную ВТСП сеть в г. Мехико* ..... 8

*Накопители энергии на маховиках – альтернатива батареям* ..... 8

*Киотский протокол увеличивает шансы сверхпроводников*..... 9

### КОНКУРСЫ

*Роснаука 2005 г. Новые победители по проектам в области сверхпроводимости* ..... 10

## *Nature* повторяется...

Один из последних номеров *Nature* представляет работу [1] с интригующим названием «Enhanced current transport at grain boundaries in high- $T_c$  superconductors», посвященную улучшению транспортных характеристик  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$  при легировании кальцием. Авторы работы представляют ведущие центры США (Brookhaven Nat. Lab., Oak Ridge Nat. Lab., Vanderbilt Univ., Univ. California-Davis), Японии (Univ. Tokyo) и Германии (Univ. Göttingen), разрабатывающие, в частности, технологию 2G ВТСП проводников. Удивительно, что журнал, специализирующийся на сенсационных научных открытиях, в данном случае представляет явление, исследованию которого уже посвящено как минимум 3 десятка работ различных авторов. Да и сам журнал *Nature* уже представлял читателям это открытие 5 лет назад [2]. Почему же эта тема остается настолько актуальной, что к ней возвращаются снова?

Сразу надо сказать, что специалисты по ВТСП керамике могут не волноваться – с такой микроструктурой никакой кальций не поможет. Тех, кто занимается тонкими эпитаксиальными пленками на монокристаллических подложках, это тоже не особенно касается – транспортные свойства самого сверхпроводника  $Ca$  не улучшает, а вот  $T_c$  с ростом уровня легирования кальцием заметно падает в результате дырочного передоирования [3,4].

Лучше всего  $Ca$  действует на достаточно совершенные зернограницные структуры, которые можно себе представить как регулярные сетки дислокаций или решетки совпадающих узлов, т.е. существенно двумерные дефекты, “толщина” которых не превышает 1-2 постоянных кристаллической решетки. Именно, такие зернограницные структуры реализуются в 2G ВТСП лентах. Поскольку биаксиально текстурированные металлические ленты, по определению, имеют блочную структуру, то и в слое ВТСП неизбежно возникают малоугловые границы. И именно для них следует ожидать наибольшего положительного эффекта от легирования кальцием. Конечно, сначала надо решить вопросы химической и фазовой однородности и достижения оптимальной текстуры ВТСП слоя.

Выяснению влияния добавок кальция на химический состав и структуру отдельных зернограницных дислокаций и посвящена работа [1]. Для решения этой задачи задействована самая мощная на сегодняшний день техника: сканирующая просвечивающая электронная микроскопия с абберрационной коррекцией, которая позволяет измерять спектры энергетических потерь электронов на отдельных атомных колонках в кристаллической структуре. Выводы авторов таковы:

- 1) область дислокации сильно обогащена кальцием по сравнению с объемом зерна;

- 2) ядро дислокации включает 2 атомные колонки в отсутствие  $Ca$  и 3 в его присутствии;
- 3) в отсутствие кальция область дислокации сильно обедняется по содержанию кислорода (и соответственно по концентрации дырок);
- 4) введение кальция приводит к снижению дефицита кислорода в области дислокации (соответственно восстанавливает объемную концентрацию дырок на границе);
- 5) вблизи дислокации кальций замещает не только иттрий, как в объеме зерна, но также и  $Ba$  в области сжатия, и  $Si$  в области растяжения (ядро дислокации можно рассматривать как своеобразный механический диполь, соединяющий области растяжения и сжатия);
- 6) в присутствии кальция поле механических напряжений вокруг “дислокационного диполя” оказывается меньше.

В конечном счете, роль кальция сводится к снятию механических напряжений и электрического заряда с границы кристаллитов. Интересно, что это и предполагали исследователи из Аугсбурга [2], хотя у них и не было такой прекрасной техники, как у американцев.

Наконец, нелишне отметить, что кальций улучшает не только транспортные свойства в латеральном направлении слоя ВТСП, но и помогает бороться с другой застарелой проблемой – падением критического тока с увеличением толщины ВТСП проводника. При этом даже нет необходимости легировать весь слой кальцием ( $T_c$  все-таки имеет значение!). Достаточно отдельных прослоек легированных кальцием фазы между слоями чистого  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$  [2,5]. В принципе, такая архитектура прекрасно совместима с технологией 2G ВТСП, где применяется прокрутка металлической ленты через последовательность реакторных модулей, в которых наносят отдельные слои.

О.Горбенко

- 1) *Nature* 2005, 435, 475
- 2) *Nature* 2000, 407, 162
- 3) *Supercond. Sci. Technol.* 2004, 17, S422
- 4) *Physica C* 2002, 378–381, 107
- 5) *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2003, 13, 2825

## РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ

### *Можно ли вернуть утраченное лидерство за 300 тыс. долл.?*

Победителем конкурса Роснауки 2005 года по приоритетному направлению “Индустрия наносистем и материалы” на тему «Разработка перспективных технологий получения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) - материалов второго поколения» стал РНЦ «Курчатовский институт».

Тема представлена в нанотехнологическом приоритетном направлении Роснауки, поскольку высоких величин инженерной критической плотности тока в ВТСП керамике состава  $Y-123$  при температуре кипения жидкого азота с приемлемой для технического применения зависимостью от магнитного поля можно достичь лишь при формировании тонких, порядка 10-1000 нм, многослойных высокотекстурированных слоев. Зарубежные ВТСП компании в быстром темпе стали осваивать технологию ВТСП длинномеров на основе таких пленок (т.н. ВТСП второго поколения) с целью завладеть промышленным рынком, вкладывая крупные суммы – десятки и сотни млн. долл. Правительства США, Японии, Китая, ЕС оказывают этому начинанию всемерную поддержку, надеясь приступить к назревшей острой необходимости обновления устаревших генерирующих и сетевых мощностей энергосистем оборудованием, достойным XXI века.

В 70-х годах Курчатовский институт при активном участии ВНИИНМ им. А.А.Бочвара, Ульбинского металлургического завода (теперь на территории Казахстана) и ВНИИКП возглавил в СССР разработку технологии НТСП длинномеров на основе  $NbTi$ , а затем и  $Nb_3Sn$ , доведя ее первыми в мире до промышленного уровня. На их основе курчатовцы (опять же первыми в мире) создали самый крупный в мире токамак Т-15 со сверхпроводящим магнитом (не будем печалиться о его судьбе). Но...результат не утратил актуальности, дает о себе знать и сейчас, ибо обеспечил участие России в престижном международном проекте создания термоядерного реактора (проект *ITER*), как возможной эффективной электростанции будущего. Так что сегодняшний лозунг, выставленный на растяжке поперек Ленинского проспекта «Спутник – это все, чем ты можешь гордиться, если перестанешь мечтать», скорее, отражает комплексы или неосведомленность автора.

Прокомментировать сегодняшнюю готовность Курчатовского института догнать и перегнать уже не только Америку (как мы мечтали в советские времена), а весь просвещенный мир отважился Виталий Сергеевич Круглов, заместитель директора ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт» и заместитель руководителя проекта.

*Расскажите немного об общей ситуации с новым проектом*

Приятно, что

- принят проект, посвященный разработке перспективной технологии получения сверхпроводников II поколения с улучшенными характеристиками и сниженной стоимостью;
- удачное выполнение проекта позволит сделать решающий шаг в направлении созда-

ния 2G промышленной технологии, а затем широко внедрить сверхпроводники в электроэнергетику, которая у нас (как показало недавнее обесточивание Москвы и близких к ней регионов), да и во всем мире переживает не лучшие времена – оборудование устарело, требует замены; разработанный ВТСП провод потянет за собой цепочку разработок модельных, а затем и реальных электротехнических устройств;

- приняты и еще 2 сверхпроводящих проекта: один – в электроэнергетике и второй – по слаботочной сверхпроводимости.

Неприятно, что

- к сожалению, пока ни один из принятых проектов еще не финансируется ни Роснаукой, ни Росатомом, ни Минэнергопромом,
- нет проектов по фундаментальным исследованиям сверхпроводимости,
- нет заказов от промышленности на разработки новых приборов и устройств,
- экспертиза отдана на откуп не компетентному Научному совету (как это было ранее), а вновь образованным «мониторинговым» ООО, сотрудники которых только входят в предмет, создавая бесконечную волокиту с уточняющими запросами (возможно, именно этим объясняется задержка с началом долгожданного и такого необходимого финансирования),
- выделяемые деньги по сравнению с выделяемыми за рубежом – просто нищенские, десятые доли процента от зарубежных, можно сказать, что это – просто ничто! Расчет – только на энтузиазм и какие-то сверхновые идеи,
- на митинг протеста против бедственного положения науки в России собрались только несколько сотен человек – либо это покорность от безнадежности, либо безразличие.

*Можно ли вернуть утраченное лидерство?*

Сомнительно. Вспомните Германию конца 30-х годов, когда была изгнана профессура. Только спустя 60 лет немцы могут сказать «Профессура готова!»

*Какие организации участвуют в выполнении проекта и как разделены задачи?*

Думаю, что выбран оптимальный из возможных вариантов. Участвуют в проекте 3 организации. Это – Курчатовский институт, который является признанным лидером в области конструкции СП-проводов (размеры, геометрия, изоляция с учетом конкретного применения для стабильной работы) и в электродинамической поддержке работы (правильные измерения на постоянном и переменном токе). У нас здесь большой опыт успешной работы

Затем ВНИИНМ, очевидный российский лидер в технологических разработках ВТСП длинномеров. На сегодня они достигли высокого уровня в технологии ВТСП проводов I поколения – 200 м при токе 100 А. Здесь неожиданная трудность – уход руководителя технологической группы Игоря Акимова, с которым, вне сомнения, связаны указанные успехи. На коллектив ВНИИНМ возложена задача изготовления длинных лент-подложек из  $Ni$  и  $Ni$  сплавов с высокой степенью текстуры. Им в помощь определен Институт физики металлов УрО РАН из Екатеринбурга, проводивший аналогичные разработки несколько лет назад в сотрудничестве с МГУ. У них нет опыта создания лент достаточно большой длины со специфичными проблемами полировки (для формирования текстуры требования к качеству поверхности подложки очень высокие). Планируется, что ВНИИНМ подхватит их технологию и масштабирует ее, хотя не возбраняется и пойти своим путем, например, формировать ленту из порошков (в чем у ВНИИНМ есть опыт). Задача очень ответственная, если удастся сформировать высокую текстуру в ленте-подложке, то именно от нее можно идти дальше, формируя высокую текстуру в ВТСП слое.

И далее - химический факультет МГУ, группа профессора А.Р.Кауля, который провидчески самоотверженно много лет занимался *MOCVD* технологией - осаждение ВТСП пленок из металлоорганических соединений в безвакуумной среде. Надо признать, что мы слабо поддерживали эту работу (скажем прямо, в погоне за быстрым результатом, делая основную ставку на технологию «порошок-в-трубе»). Но..., еще раз повторяю, самоотверженность сотрудников, фундаментальная школа Кауля, твердая поддержка руководителя направления материаловедения акад. Ю Д Третьякова, зарубежные контракты способствовали тому, что основное направление технологии созрело, получены довольно обнадеживающие результаты. Правда, на российском оборудовании они могут получать только короткие образцы. Для организации непрерывного процесса осаждения на длинных образцах необходимо не только научиться получать длинные металлические подложки, но и изготовить новый смеситель подачи исходных компонентов. Это – достаточно сложная и дорогая разработка (требуются десятки миллионов рублей), не реализуемая в рамках выделенных на проект средств. Сейчас по технологии Кауля осаждение на длинные подложки осуществляется в Германии. На германской установке можно осаждать ВТСП слой на ленты длиной до 30 м и получать достаточно высокие криттоки (до  $2 \text{ MA/cm}^2$ , транспортные токи больше 100 А на см ширины). Самоотверженность и успехи сотрудников МГУ оценены – им передаем половину выделенных на проект средств.

Работы в РИЦ Курчатовский институт возглавит автор данного интервью, в МГУ - Андрей Рафаилович Кауль, а во ВНИИНМ – Александр Константинович Шиков. Общую научную координацию будет осуществлять член-корр. РАН Николай Алексеевич Черноплеков.

*Какие конечные цели у данного проекта?*

Конечная цель – создать вариант промышленно масштабируемой технологии и получить 10 м провод с параметрами на мировом уровне (для получения больших длин, конечно, нужны на порядки большие деньги). Первый этап - создание технологии получения длинных лент-подложек из никеля и его сплавов методами металлургии и прокатки (это дешевый и эффективный метод). Буферный слой планируем осаждать в одном процессе с ВТСП слоем *MOCVD* методом. Следующим шагом видится масштабирование технологии в рамках ОКР с целью получения длинномерных лент при сохранении высоких токонесущих характеристик.

В мире, имеющем «немеренные» (по наши меркам) финансовые ресурсы, сейчас активно исследуют в поисках лучшего самые разные технологические варианты. Конечно, хорошие результаты дает и ионное и магнетронное осаждение. Но это для нас слишком дорого. Ведь важно получить не только высокие токи, но и оптимизировать соотношение цена-качество. И здесь *MOCVD* – вне конкуренции: отсутствие вакуума, возможность совместить в одном процессе осаждение и ВТСП, и буферного слоя.

*Прокомментируйте последние технологические новинки из-за рубежа – освоение производства широких лент – 4, 10, 20 см, а затем из них резкой – стандарт – 0.44 см. Получение в одном процессе покрытия большой площади тоже ведет к сокращению затрат на производство и удешевляет стоимость провода.*

Усовершенствование процесса должно идти вслед за разработкой базовой технологии. Вот мы как раз и займемся базой, как только будут перечислены деньги за уже принятый проект. Кстати, у нас, в Курчатовском институте имеется установка для осаждения пленок на большие площади методом магнетронного осаждения: она используется для осаждения защитного покрытия на оконные стекла в коммерческих целях. Но процесс – очень медленный, для наших целей он малопригоден. Принципиально осадить на большую площадь - не проблема, но при резке нарушается край ленты, необходимо вводить дополнительные непростые операции по его защите. Иначе ток упадет.

*А другая технологическая новинка из-за рубежа – создание многослой «ВТСП-буфер» для увеличения транспортного тока?*

В реалии с ростом толщины непрерывной пленки инженерная плотность тока, начиная с некоторой

критической толщины, начинает падать, что связано с ухудшением текстуры. Эта оптимальная толщина во всех разработках и принята за базовую. Если сделать многослойную конструкцию, перемежая ВТСП слои буферными, ток, вне сомнения, возрастет. Но, думаю, формирование повторяющейся в слоях текстуры в многослойке – сложнейшая технологическая задача. Пока за рубежом это сделали только на длине 1 см, как пойдут дела при длинном проводе, еще не ясно. Но, конечно, пробовать можно. Более реальным представляется получение двухсторонних покрытий и (или) широких лент, которые могут быть ламинированы на ленты требуемой ширины. То, что кадры и достойное финансирование решают все, продемонстрировал несомненный мировой лидер фирма AMSC.

*Даже представитель Министерства энергетики США заявляет о консервативности поставщиков электроэнергетики в отношении новых технологий, под которые ВТСП компании уже строят заводы. Вопрос в том, будут ли они покупать эти длинные ленты. Как обстоят дела в России?*

Относительно заводов. Нужно ли спешить? Народная мудрость «спеши медленно» оправдывает себя. Известно, что и в США, и в Китае развиты заводские годовые мощности для производства до 20 км ВТСП проводов I поколения. Это, по-видимому, оказалось преждевременным, т.к. в настоящее время основное потребление для линий электропередач, тоководов и магнитных систем на поля свыше 25 Тл еще в должной мере не востребовано. Вполне возможно, что часть производственных площадей будет переориентировано на 2G технологию. Свойства, а главное заметная стоимость проводов первого поколения не полностью удовлетворяют требованиям промышленности, но своя вышеперечисленная ниша у них, без сомнения, существует.

Относительно энергетических компаний. Не вызывает сомнения, что в середине 21 века решающий вклад в электроэнергетику внесут именно сверхпроводники. Понимание этого на уровне ученых из энергетики есть. Но использование криогенной техники для ВТСП проводов требуют перестройки мышления прикладников и высокой культуры труда. Промышленность боится криогеники. Именно эта боязнь (связанная с отсутствием опыта) не позволила продвинуть в энергетику ВТСП провода, где сложное гелиевое охлаждение, требующее исключительно высокой квалификации обслуживающего персонала. Вспомним усилия курчатовцев по внедрению магнитного сепаратора для обогащения криворожских руд - пока работали командированные курчатовцы, все шло отлично, как только уезжали - сепаратор заклинивало. Азотный уровень, необходимый для ВТСП проводов, конечно, более простой, но все равно нужна высокая культура труда. Чтобы промышленники приняли сверхпроводни-

мость с криогеникой, необходимо также продемонстрировать ее большие преимущества.

Другой существенный сдерживающий фактор – стоимость ВТСП проводов, во всяком случае, это относится к уже появившимся на рынке ВТСП проводам первого поколения – 200 долл. за кАм. Для ВТСП проводов второго поколения есть надежды снизить стоимость сначала до 30-40 долл. за кАм, а в последующем и до стоимости медных проводов – 15 долл. за кАм

Контакты с российскими энергетиками установлены. Мы проводим большую кампанию по просвещению и агитации специалистов-энергетиков, стараемся показать им преимущества оборудования на сверхпроводниках. Конечно, энергетики должны вложить деньги в эти разработки, а они у российских энергетиков есть. Они должны сделать заказы и заинтересовано следить за результатами.

Очень важным сейчас представляется создание отечественного полигона, на котором можно испытывать различное оборудование на сверхпроводниках – токоограничители, трансформаторы, накопители. Главное, чтобы на базе полигона было создано некое научное подразделение, призванное готовить специалистов из нынешних студентов – физиков, инженеров. Для них это оборудование должно стать естественным и привычным. Именно полигон должен позволить оценить все преимущества сверхпроводникового оборудования в комплексе.

*Насколько реально строительства такого полигона в России?*

Все это реально. Но нужно новое мышление промышленников. За рубежом финансирование ВТСП электротехнических разработок со стороны промышленности более высокое, чем государственное. В России это далеко не так, что связано с общим состоянием промышленности в России.

*Несколько лет назад обсуждался возможный контракт с Норильским никелем, в котором планировалось создать у них локальную линию электропередач, поставить на плавильные печи ВТСП тоководы, поставить сепаратор. В каком состоянии эти переговоры?*

Да. Такие переговоры велись и даже обсуждали с ними возможность финансирования разработок длинномерных ВТСП проводов. Мы подготовили свои предложения, наши представители ездили на Норильский комбинат, вели переговоры на самом высоком уровне. Но они сочли, что еще не настало время для таких разработок, проще заработать деньги более привычным путем. На сегодня они финансируют только небольшой проект по магнитному сепаратору по договору между Курчатовским институтом и Норильским никелем.

Сколько сотрудников планируете привлечь к выполнению проекта Роснауки?

Думаю, что в рамках финансовых возможностей проекта в 3-х организациях мы можем привлечь не более 40-50 человек. Много средств предстоит затратить на материальное обеспечение проекта – дорогие материалы, дорогая криогеника. Так что сотрудники вынуждены будут питаться энтузиазмом, работая фактически бескорыстно. 5 млн. руб. в год – это в более привычных для сравнительной оценки около 180 тыс. долл. По меркам США такую сумму в год дают на полчеловека, работающего в высоких технологиях. Грустно.....!

## ВТСП ПРОВОДА И КАБЕЛИ

**AMSC. Очередной шаг к снижению стоимости ВТСП лент**



В мае с.г. American Superconductor Corporation (AMSC) сообщила об успешном производстве первой в мире 20-ти метровой ВТСП  $YBaCuO$  ленты второго поколения (2G) шириной 4 см в непрерывном процессе с намоткой на барабан. Затем эта лента была разрезана также в процессе намотки на барабан на ленты шириной 0,44 см – промышленный стандарт в США для коммерческих ВТСП проводов. Ток в лентах шириной 0,44 см – от 60 до 70 А при 77 К, что в 75 раз выше, чем проводит медный проводник такого же сечения.

AMSC разрабатывает 2G ВТСП (Y-123) проводники для замещения коммерческих 1G ВТСП проводов (Bi-2212), сегодняшней рабочей лошади в электротехнических ВТСП разработках. AMSC изготовила одну 1G ленту длиной 1000 м и шириной 4 см, передающей ток, в 140 раз более высокий, чем в аналогичных медных проводниках. Однако, AMSC планирует к концу 2005 года освоить изготовление

100 м 2G лент с токами более высокими при в 2-5 раз меньшей стоимости в сравнении с 1G. Следующий этап на пути снижения стоимости – переход к технологии изготовления лент 10 см ширины. Со второй половины 2005 года AMSC начнет поставлять коммерческие 2G ленты потребителям.

<http://www.amsuper.com/products/htsWire/2GWireTechnology.cfm>

## AMSC изготовит ~50 км ВТСП ленты для Ultera

AMSC получила заказ на изготовление 48760 м ВТСП ленты для изготовления 200 м кабеля, который будет установлен в системе распределения большой электрической подстанции в Columbus (шт. Огайо). Кабель начнет функционировать в действующей сети American Electric Power летом 2006 года и будет снаб-

жать электроэнергией 8200 индивидуальных и промышленных потребителей. Новый кабель заменит алюминиевую шину в 13 кВ части подстанции. Проект установки кабеля выполняется компанией Ultera (<http://www.ultera.net>). Половину расходов 8.65 млн. долл. проекта обес-

печивает Министерство энергетики США. Ultera – специализированная компания, нацеленная на разработки и коммерциализацию ВТСП силовых кабелей, учреждена совместно двумя мировыми лидерами по производству силовых кабелей - Southwire Company (Carrollton, шт. Джорджия, США) и NKT cables (Cologne, Германия). В проекте также участвуют компания Praxair (криогенная система), TechCenter (контрольная аппаратура), Oak Ridge National Laboratory (технологические исследования ВТСП проводников).

[http://www.electricity.doe.gov/documents/columbus\\_cable.pdf](http://www.electricity.doe.gov/documents/columbus_cable.pdf)

**Достижения японских компаний на конец 2004 года**

Компания, исследовательский центр	Технология	Длина ленты, м	Ток, А
Fujikura, Ltd.	IBAD/PLD	105	126
		короткий образец	300
	IBAD	255	-
SRL-ISTEC	IBAD/PLD	45,8	182
	IBAD	220	-
	IBAD/MOD TFA	8,6	119
		короткий образец	413
Chubu Electric	Ag/IBAD/MOCVD	200	60
	IBAD/MOCVD	0,8	20-60
Showa Electric	RABITS Ni-W	230	-
	TFA YBCO	короткий образец	100-120
Sumitomo	RABITS/PLD	35	
	HoBCO	короткий образец	357
	RABITS/MOD (non fluorine)	10	103
		короткий образец	196

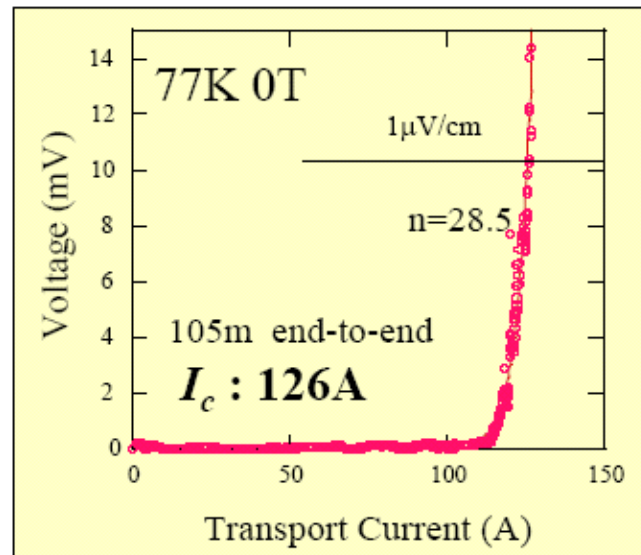
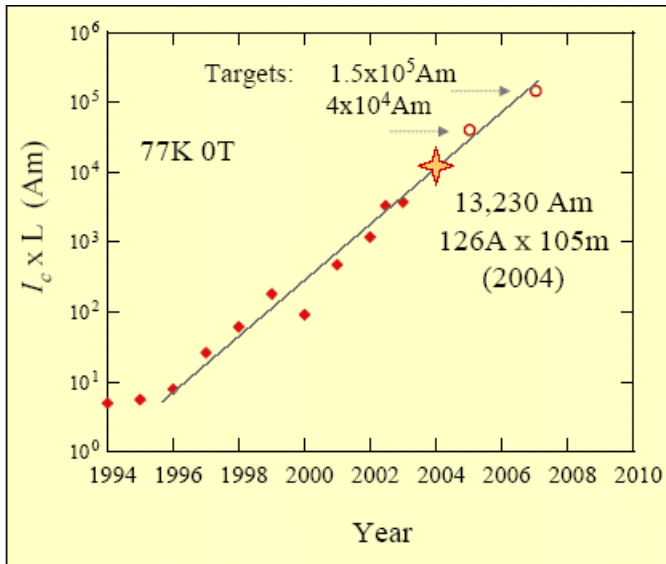
**Используемые сокращения**

SRL-ISTEC – Superconductivity Research Lab. – International Superconductivity Technology Center  
 IBAD - ion beam assisted deposition (ионно-лучевое осаждение)  
 PLD - ion beam assisted deposition (ионно-лучевое осаждение)

MOD TFA - metal organic deposition (жидкостное осаждение из органических соединений) из trifluoroacetate (трифторацетат)  
 MOCVD - metal organic chemical vapor deposition (химическое осаждение из паров металлоорганических соединений)  
 RABITS – rolling assisted biaxially textured substrates.

<http://www.energetics.com/wire05.html>

**ВТСП проводам предстоит одолеть летаргию сетевых компаний**



YBCO провода японской компании Fujikura неуклонно приближаются к цели, обеспечивающей им конкурентоспособность с медными.

На фоне очевидного прогресса 2G технологии (см. рис.) ВТСП компании стали «бешено» наращивать объем производства. Компания SuperPower строит завод (Schenectady, New York), планируя произве-

сти до 1000 км 2G провода уже в 2006 году. «Еще не ясно, какова будет стоимость 2G провода, но, очевидно, значительно ниже стоимости 1G» - сказал Selvamanickam, сотрудник SuperPower. Компания American Superconductor выпустила акции на сумму 45 млн. долл., чтобы построить промышлен-

ную линейку по производству 2G провода на заводе в Ayer, Massachusetts.

«Это история удивительной науки и невероятной работы» в университетах, национальных лабораториях и ВТСП компаниях, сказал Paul Grant, многолетний знаток сверхпроводимости, который недавно оставил свою работу в Electric Power Research Institute, чтобы открыть собственную консалтинговую компанию. По его мнению, на пути коммерциализации разработок ВТСП проводов стоит глубокая консервативность компаний-поставщиков электроэнергии и других компаний в области тяжелой индустрии. Вопрос в том, будут ли они покупать ВТСП продукцию.

«У меня самого есть сомнение, здесь ли золотая жила?» - продолжил Grant. «В лучшем случае, поставщики электроэнергии равнодушны. Некоторое время назад они субсидировали разработки, надеясь, что стоимость ВТСП провода станет меньше со временем». Jim Daley, руководитель сверхпроводящей программы в Министерстве энергетики США высказался более агрессивно – «Мы имеем дело с промышленностью, которая находится в состоянии летаргии и не примет новую технологию легко. Им трудно вкладывать средства в столь новую технологию».

Оптимизм рождает тот факт, что три сетевых компании уже участвуют в трех различных экспериментальных проектах по установке 1G силовых ВТСП кабелей. Их успех может вдохновить остальных. Создание ВТСП генераторов и других электротехнических приборов может помочь ВТСП компаниям остаться на плаву. Но если поставщики электроэнергии споткнутся, то всей high-tech отаги в мире не хватит, чтобы ВТСП провода стали действительными игроками на «силовом» поле.

1. *Science* 2005, **308**, p.349
2. <http://www.energetics.com/wire05.html> (графики)

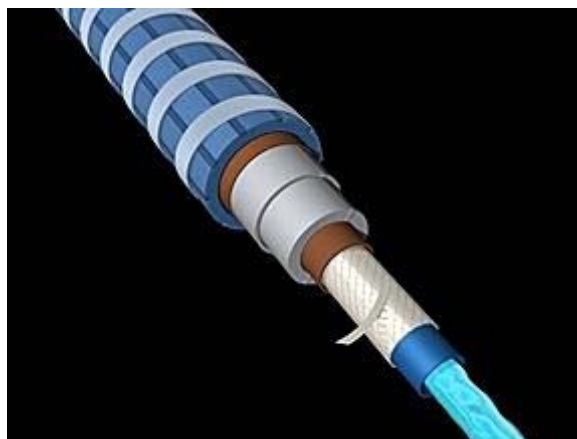
## ВТСП УСТРОЙСТВА В ДЕЙСТВИИ

### *Компания Condumex построит подземную ВТСП сеть в г. Мехико*

Condumex (основной бизнес – энергетика и телекоммуникации) является самым большим в Мексике производителем проводов и кабелей с объемом ежегодных продаж около 1.5 млрд. долл. (что составляет 32% от общего объема продаж компании). Condumex разместила заказ на изготовление ВТСП проводов первого поколения (1G) в компании American Superconductor Corporation (AMSC). Condumex изготовит кабели и установит их в подземной электросети на электрической подстанции в г. Мехико. Проект должен продемонстрировать способность ВТСП кабелей выдерживать увеличенную передаваемую мощность, помогая преодолеть сегодняшние слабые места традиционных сетей и обес-

печивая жителей города более надежным и экологически безопасным электропитанием. Треть расходов компании на реализацию проекта берет на себя правительство Мексики.

Распределительная кабельная система на переменном токе способна передавать 47 МВт мощность. ВТСП кабели будут проводить большую мощность, так как по ВТСП проводам компании AMSC можно пропускать токи в 140 раз большие в сравнении с медными проводами при сравнимых размерах.



Condumex полагает, что ВТСП провода также качественно изменят энергетический бизнес, как оптическое волокно в свое время изменило телекоммуникационный. ВТСП кабельная система Condumex будет состоять из 3-х кабелей с теплым диэлектриком длиной 33 метра каждый. На их изготовление будет затрачено 10 км ВТСП провода. Система, которую установят в 2006 году, будет работать под напряжением 15 кВ и пропускать ток 1800 А в каждом из кабелей.

Завершив эти работы, Condumex присоединится к растущему числу ведущих кабельных компаний мира, которые уже СЕГОДНЯ строят ВТСП кабельные системы, заняв твердое положение на быстрорастущем рынке, предлагающем новые эффективные энергетические решения.

<http://www.amsuper.com/products/htsWire/HTSCables.cfm>

### *Накопители энергии на маховиках – альтернатива батареям*

Маховики, основанные на бесфрикционных сверхпроводящих подшипниках, могут значительно улучшить качество и надежность систем электроэнергетики. Маховые системы могут найти применения в системах бесперебойного электроснабжения (UPS) и системах выравнивания уровня электрической нагрузки. Как устройства накопления электроэнергии, маховые системы могут преобразовывать электрическую энергию в кинетическую с помощью электрического мотора, хранить энергию при вращении маховика и использовать кинетиче-



скую энергию вращения для генерации электричества по мере необходимости.

Компании-поставщики электроэнергии и некоторые промышленные компании используют маховые системы для уверенности, что потребители электроэнергии и критическое оборудование будут снабжаться электричеством бесперебойно даже в ситуации непредусмотренных нарушений в электросетях. Они также могут планировать более эффективную работу электростанций сглаживанием флуктуаций, вызванных изменением нагрузки. В сравнении с химическими электрическими батареями маховые системы способны сохранять большие запасы энергии в резерве в меньшей, экологически более безопасной упаковке и значительно дольше.

Маховые электрические системы обеспечивают большую гибкость и эффективность выравниванием нагрузки и уменьшением расхода электричества. Традиционные маховые системы используют только в специальных случаях, потому что трение в подшипниках и сложная система управления приводят к потерям энергии, по крайней мере, от 3 до 5 % в час. Чем меньше трение в системе подшипников и чем меньше сопротивление воздуха, тем более эффективно накопление электроэнергии. До недавних разработок массивных, самоцентрирующихся ВТСП подшипников потери энергии, связанные как с механическими, так и с электромеханическими подшипниками были чрезвычайно высоки. Использование активных электромагнитных подшипников уменьшило эту проблему благодаря их бесконтактной природе. Однако эти системы достаточно дороги из-за сложной системы управления. С разработкой ВТСП подшипников потери могут быть уменьшены до 0,1% в час при высокой стабильности вращения маховика. Потери меньше 0,1% в час уже продемонстрированы на экспериментальных устройствах.

Argonne National Laboratory объединилась в команду с Boeing Phantom Works для разработки технологии больших маховых систем на основе ВТСП подшипников. Такая система сэкономит поставщикам и потребителям электроэнергии миллионы долларов. Ранее Boeing при поддержке Министерства энергетики США разработал две лабораторные маховые системы для выравнивания нагрузки – 2 кВт·час и 10 кВт·час/3 кВт. Опыт, полученный в этих экспериментах с различными конструкциями ротора 3 кВт маховика, оказался полезным для создания базовой технологии 5 кВт·час/100 кВт системы, которая создается объединенной командой Argonne National Laboratory и Boeing Phantom Works для демонстрации в сети третьего партнера по разработке – сетевой компании Southern California Edison (SCE). Партнеры надеются разработать и про-

вести испытания амбициозной 30 кВт·час маховой системы в сети SCE в 2006 году.

#### Монтирование ротора 100 кВт маховика



#### **Киотский протокол увеличивает шансы сверхпроводников**

Глобальный акцент на новые источники энергии в связи с принятием 140 странами Киотского протокола ускоряют внедрение ВТСП систем регулирования электрической мощности в сетях, разрабатываемых компанией AMSC. В рамках нового Kingsbridge Wind Power проекта AMSC получила заказ на поставки одной из ее систем регулирования сетевого напряжения - D-VAR(R) для ветряной электростанции, расположенной вблизи Годерич (Goderich, провинция Онтарио, Канада). Электростанция включает 22 ветряных турбинных генератора, обеспечивающих производство 39,6 МВт возобновляемой «чистой» энергии.

На сегодня электростанция в Годериче – это 9-ая ветряная электростанция в США и Канаде (а в мире – 10-ая), доверяющая технологиям компании AMSC управление напряжением в системе соединения электростанции с потребительской сетью. При установке в Годериче AMSC's D-VAR системы будут управлять в сумме 677 МВт электрической мощности, достаточной для обеспечения свыше 335 тысяч индивидуальных потребителей.

Разработчик Kingsbridge проекта - компания EPCOR Power Development Corporation (<http://www.epcor.ca>).

AMSC планирует поставить систему *D-VAR* в Онтарио в июле с.г.

*D-VAR* системы обеспечивают динамическое и статическое регулирование напряжения всей ветряной электростанции и модифицируют его реактивную выходную мощность в соответствии с требованиями локальной сети электропередач. *D-VAR* также поддерживает стабильную работу сети в аварийной ситуации.

[http://www.electricity.doe.gov/documents/columbus\\_cable.pdf](http://www.electricity.doe.gov/documents/columbus_cable.pdf)

## КОНКУРСЫ

### ***Роснаука 2005 г. Новые победители по проектам в области сверхпроводимости***

Мы уже сообщали в предыдущем выпуске о победителе конкурса Роснауки 2005 г. *по приоритетному направлению "Индустрия наносистем и материалы" (I очередь)* - Российский научный центр «Курчатовский институт» «Разработка перспективных технологий получения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) - материалов второго поколения». И вот еще один победитель

- *по приоритетному направлению "Энергетика и энергосбережение" (II очередь)*

Лот 14. «Разработка электрооборудования с использованием технологии высокотемпературной сверхпроводимости».

**Победитель конкурса:** Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии" (ФГУП "ЦНИИ СЭТ"), г. Санкт-Петербург.

Лимит бюджетного финансирования: всего – 20.0 млн. рублей; в том числе на 2005 год – 10.0 млн. рублей.

Объем средств из внебюджетных источников: всего – 8,0 млн. рублей, в том числе на 2005 год – 3,0 млн. рублей.

Срок выполнения: 2005-2006 годы.

ЦНИИ СЭТ – не совсем новый игрок на поле сверхпроводимости. Возможности этой организации и состав соисполнителей проекта надеемся прояснить и опубликовать в сентябре с.г. в обещанном интервью победителя.

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

### ***И новый конкурс!***

В 2005 году РФФИ открывает новый конкурс по области знаний «**Фундаментальные основы инженерных наук**», в конкурсных темах которого также представлена техническая сверхпроводимость – 08-306 «Электротехника и техническая проводимость» (срок регистрации заявок – 18.07.05 на сайте <http://grant.rffi.ru> ).

## СЕГОДНЯШНИЕ РЕКОРДЫ

В термоядерном реакторе-токамаке горячая плазма удерживается полем сверхпроводящих магнитов. На европейском токамаке *JET* и японском *JT-60* выходная мощность *приближается* к входной.

Рекорд достигнут на *JET*: максимальная выходная мощность **16 МВт**.

В токамаке, планируемом к запуску во Франции в 2015 году и создаваемом по международному проекту *ITER*, ожидают выходную мощность **400-700 МВт**, *превосходящую* входную.

*Nature*, 2005, **435**, 1142

### **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](mailto:ssi@iht.mpei.ac.ru)

В подготовке выпуска принимали участие:

*О.Ю. Горбенко*, *С.Т. Корецкая* [stk@issp.ras.ru](mailto:stk@issp.ras.ru) (095) 930 3389; *Ю.Г. Метлин*; *А.К. Чернышова*  
[chak@newmail.ru](mailto:chak@newmail.ru) (095) 196 7200;

Верстка *И.Л. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Ю.К. Мухин*