



Том 5 выпуск 1
февраль 2008

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Сверхпроводниковые технологии в Национальных Лабораториях США

Успехи американских компаний базируются, в основном, на знаниях, полученных в университетах и национальных центрах. Так, технология, используемая American Superconductor (AMSC), разрабатывалась в Оак Ридже (ORNL), а технологические процессы SuperPower впервые опробованы в Лос-Аламосе (LANL). Кооперация осуществляется как в рамках двустороннего сотрудничества, так и при финансовом участии государства, в основном, в лице министерства энергетики (т.н. Cooperative Research and Development Agreement, CRADA). Только на поддержку ORNL в этом году было выделено 800 тыс. USD – для сотрудничества с SuperPower и 850 тыс. USD – с AMSC. LANL на разработку 2G-ленты по CRADA выделено 1,75 млн. USD. Объём исследований огромен, поэтому автор нижеприведённой заметки остановился только на наиболее примечательных результатах, представленных на Peer Review 2007 [1].

Лента-подложка

Текстурированной лентой в Америке занимается группа из Оак Риджа. В этом году завершена передача технологии производства RABiTS (биаксиальное текстурирование подложки с помощью прокатки) из ORNL в AMSC и компания теперь сама производит текстурированную ленту. ORNL продолжает активно работать над усовершенствованием текстурированных подложек и предоставляет AMSC свои технологические возможности (прокатное оборудование, установленное в чистых комнатах). Что нового в 2007-м году? Во-первых, отметим угасание интереса ORNL к подложкам из меди и немагнитного сплава Ni-Cr. Вероятно, подходящей для промышленности технологии нанесения на них оксидных слоев американцам создать не удалось. Вместо этого внимание вновь обращено на, казалось бы, изученный вдоль и поперёк сплав Ni-W. Хорошо известно, что при содержании вольфрама более 5 ат. % происходит смена текстуры прокатки типа меди на текстуру типа латуни. Исследователям из ORNL удалось найти обходную дорожку – после горячей прокатки сплав Ni с 9,3 ат. % вольфрама обладал желаемой текстурой типа меди! Но получить кубическую текстуру при отжиге сначала не удалось – после горячей прокатки лента обладала окисленной, сильно дефектной поверхностью. После стравливания поверхностного слоя и высокотемпературного отжига искомый результат был получен: образец из сплава Ni-9,3%W обладал кубической текстурой. Второе важное направление в прошедшем году – разработка биметаллических лент (по-английски их называют composite или clad tapes) (рис. 1). Ранее разными группами была не раз продемонстрирована перспективность такого подхода. Действительно, внутренний слой в такой ленте может нести, например, механическую

И далее...

КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

Сверхпроводниковая электротехника в США (2006-2007) 4

ВТСП УСТРОЙСТВА

AMSC и TECO-Westinghouse совместно разрабатывают мощные ВТСП синхронные генераторы для прибрежных ветряных электростанций 6

КРИОГЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств 7

Дефицит гелия на мировом рынке 11

КОНФЕРЕНЦИИ 11

нагрузку, а внешний, с повышенной устойчивостью к окислению – служить основой для эпитаксии. В работе ORNL показано, что внутренний слой может быть совсем нетекстурированным, и это не нарушает текстуру внешнего слоя. Созданная по биметаллической технологии лента обладает высокой прочностью (более 350 МПа, что в 2 раза больше прочности Ni-5%W). Состав использованных сплавов не раскрывается.

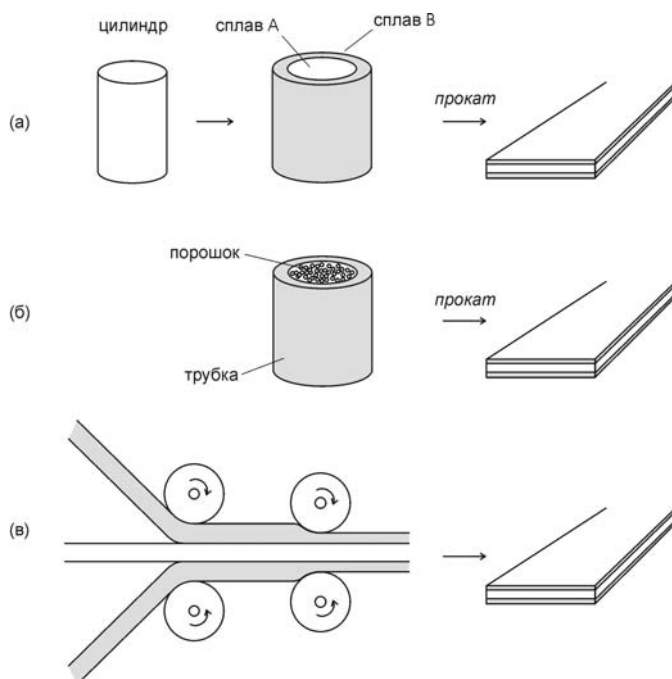


Рис. 1. Пути изготовления биметаллической ленты.

Буферные слои

Национальная лаборатория в Лос Аламосе (LANL) является создателем значительной части технологии, используемой SuperPower (см. рис. 2). В этом году

исследователи показали, что пятислойную буферную структуру можно упростить, сделав трёхслойной: SZO/IBAD*-MgO/Al-Y-O/хастеллой. Два первых слоя в пятислойке, Al₂O₃ для блокирования диффузии кислорода ("buffer layer") и Y₂O₃ для предотвращения взаимодействия MgO с Al₂O₃ ("nucleation layer"), успешно заменили аморфным слоем Al-Y-O. Такой слой толщиной около 150 нм оказался даже лучше двух слоёв. Текстура MgO не зависит от соотношения Al/Y в широких пределах, слой полностью блокирует диффузию Ni, Cr и Mo из подложки внутрь плёночной структуры, получены ВТСП покрытия с отличной текстурой (разориентация 1,23° вне плоскости и 3,9° в плоскости подложки). Вместо второго слоя MgO и слоя манганита лантана опробован слой твёрдого раствора Sm₂O₃-ZrO₂ (рис. 3). Оказалось, что этот слой неплохо растёт на ISD (осаждение на подложку, расположенную под углом к направлению осаждения) MgO. Исследован широкий диапазон соотношения Sm/Zr и показано, что наилучшая текстура слоя получается при содержании самария 60-75 ат. %. Это соответствует содержанию Sm₂O₃ от 43 до 60 мол. % и, как следует из фазовой диаграммы, такой твёрдый раствор обладает наименьшей температурой плавления. Больше содержание самария приводит к образованию нежелательных модификаций с некубической структурой. К достоинствам нового слоя авторы работы относят низкую стоимость самария (в настоящее время это самый доступный РЗЭ), возможность использования мишеней из сплава Sm-Zr, инертность SZO по отношению YBCO, а также возможность изменять постоянную решётки, *IBAD – осаждение с помощью ионных пучков.

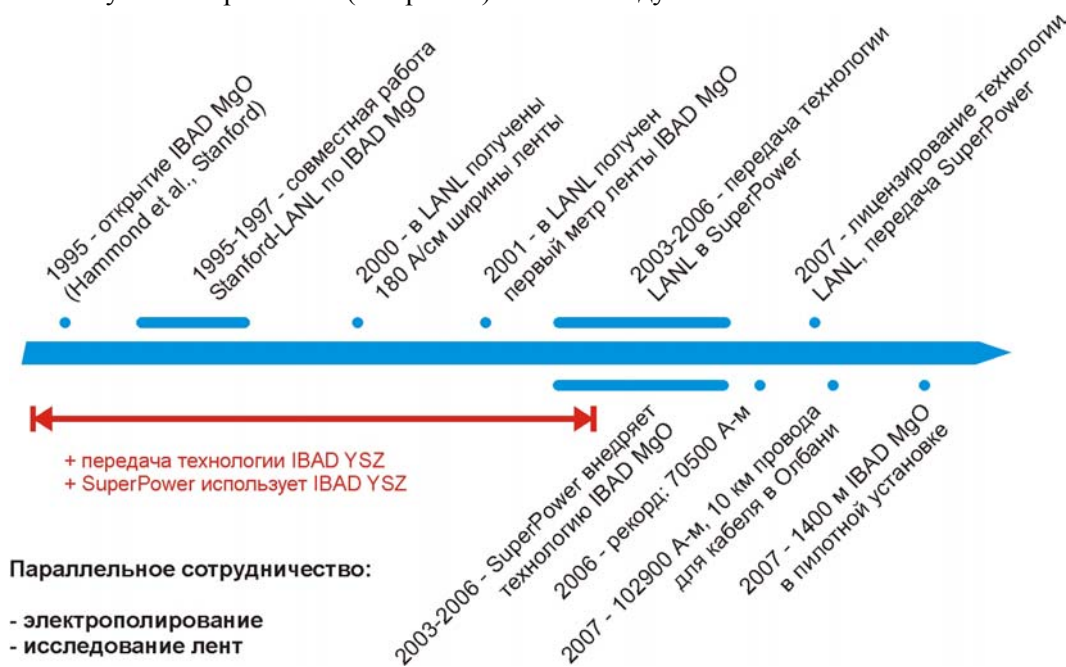


Рис. 2. Этапы сотрудничества LANL – SuperPower.

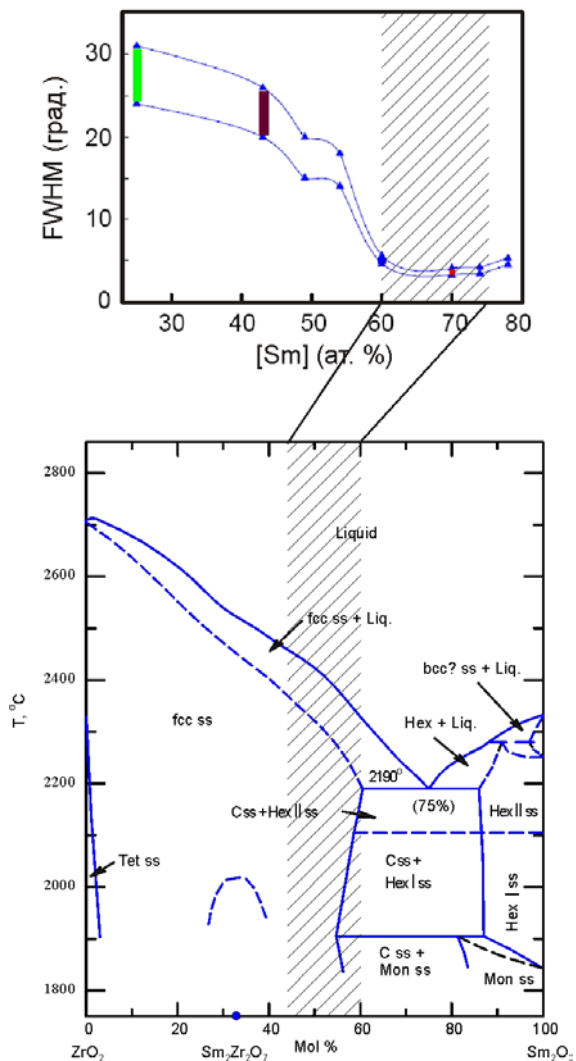


Рис. 3. Текстура нового буферного слоя SZO на IBAD MgO. Фазовая диаграмма взята из [2].

Слой ВТСП

О рекордах SuperPower хорошо известно. Высокие значения критического тока достигаются благодаря процессу MOCVD (осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы) с применением многократного прохода ленты через зону осаждения. В чём же заключается секрет высоких сверх-

проводящих характеристик? В LANL проведено всестороннее исследование этого вопроса на плёнках YBCO (10% Sm) с использованием просвечивающей электронной микроскопии. Для толщины слоя YBCO 0,7 мкм показано, что высокие значения критического тока (4,2 MA/cm², 295 A/cm) характерны для слоёв с равномерной микроструктурой без частиц CuO на поверхности. Пониженные характеристики (3,3 MA/cm², 230 A/cm) измерены для образца, в котором на поверхности наблюдалось большое количество частиц CuO и купратов бария, а вторые фазы в объёме были распределены неравномерно. Качественные плёнки YBCO толщиной 2,8 мкм (2,1 MA/cm², 600 A/cm) обладали высокой концентрацией дислокаций и наночастиц (Y,Sm)₂O₃. (рис. 4) Для скоплений последних (которые авторы называют "плоскостями") наблюдался наклон относительно плоскости ab YBCO на 3-7°. Количество этих частиц коррелирует с плотностью криттока в поле при H//ab. Обнаружены также частицы купрата YCuO₂, рост которых происходит в виде колонн диаметром 10-20 нм, проникающих сквозь толщину плёнки. Для покрытий толщиной более 1 мкм наблюдалось образование небольшого количества a-ориентации на поверхности. Интересно, что для таких образцов обнаружено некоторое повышение криттока при H//c. При определённых обстоятельствах a-ориентация может быть полезной, внося искажения, увеличивающие силу пиннинга, предполагают авторы. Показано также, что рядом с a-ориентированными зёрнами охотно образуются вторые фазы. Продемонстрировано, что токнесущая способность плёнок YBCO производства SuperPower в магнитном поле возрастает с увеличением толщины практически линейно, то есть слои 0,7 мкм, получаемые за 1 проход, эквивалентны друг другу - существенной деградации свойств не происходит. Это достижение крайне важно для технологии, включающей многократный проход ленты через зону осаждения.

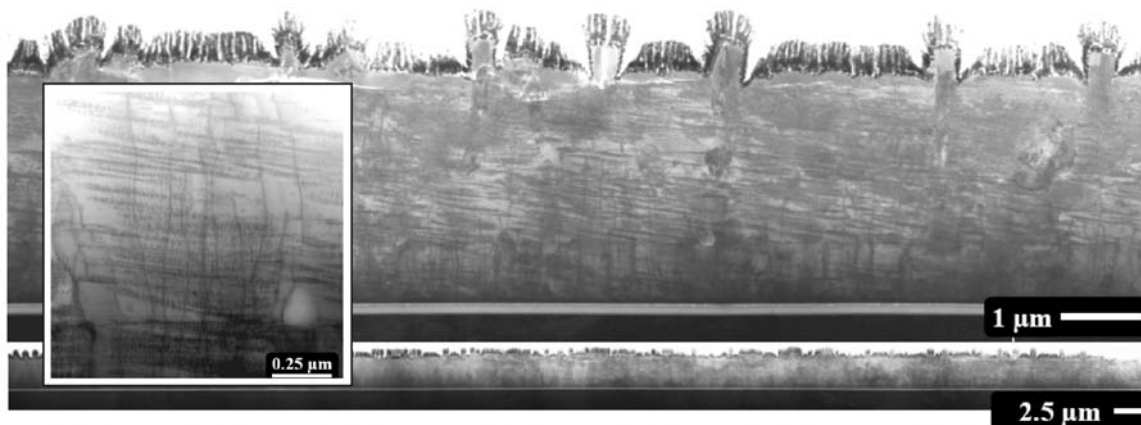


Рис. 4. Микроструктура MOCVD-покрытия YBCO производства SuperPower. Толщина слоя YBCO 2,8 мкм, J_c(77K) = 2,1 MA/cm². Видны дислокации, проникающие сквозь толщину плёнки, и наклонённые "плоскости"(Y,Sm)₂O₃. На поверхности - a-ориентированные зёрна.

Научные исследования, лежащие в основе технологии ВТСП-проводов второго поколения, идут в

США крайне интенсивно и сразу по всем направлениям. Коммерческие фирмы получают массивован-

ную поддержку от государства, сотрудничая с университетами и национальными лабораториями. В следующем году обе американские компании планируют в несколько десятков раз увеличить объем производства. Очевидно, что без крепкой научной базы это было бы невозможно осуществить в столь короткие сроки. Также очевидно, что без участия государственных научных центров не было бы новых идей, повышающих качество ВТСП-проводов и приближающих их широкое применение.

С.В. Самойленков

1. [Superconductivity for Electric Systems 2007 Annual Peer Review, USA, Virginia, Arlington.](#)
2. A. Rouanet and M. Foex, *Seances Acad. Sci., Ser. C*, **267**, 873 (1968).
3. *Сверхпроводники в электроэнергетике*, **4**, №5, 7 (2007).

КРУПНЫЕ ПРОЕКТЫ

Сверхпроводниковая электротехника в США (2006-2007)

На ежегодной отчетной сессии Министерства энергетики США (DOE) были представлены научные и финансовые отчеты правительственных организаций и частных компаний [1], занимающихся разработками ВТСП-технологий для электроэнергетики, выполненные в 2006 - 2007 гг. под патронажем и при финансовой поддержке DOE. Отчетная сессия проходила с 7 по 9 августа 2007 г. в Арлингтоне, США. Было представлено несколько опытных образцов сверхпроводникового электротехнического оборудования, разрабатываемых при поддержке DOE.

Криогенные диэлектрики

Оак-Риджская Национальная Лаборатория (ORNL) представила отчет о разработке низкотемпературных изоляционных материалов для высоковольтных ВТСП устройств. В настоящее время нет точных данных по поведению диэлектриков в импульсных и неоднородных электрических полях при низких температурах. В ORNL была измерена электрическая прочность при различных температурах для различных электроизоляционных материалов, таких как: Тувек (пористый полиэтилен высокой плотности), Каптон, PPLP (полипропилен). Были рассчитаны вероятности пробоя в жидком азоте для разной геометрии электродов. Композитные электроизоляционные материалы способны обеспечить высокую механическую прочность, хорошую теплопроводность, при заданном значении диэлектрической постоянной. Однако, обычно, при введении в диэлектрик наполнителя его диэлектрическая прочность снижается. В ORNL были разработаны нанокompозитные диэлектрические материалы (например, с добавлением частиц PVA-TiO₂, PVA-BaTiO₃ размером в 10 нм), чья диэлектрическая прочность даже выше чем у исходного материала. Для диэлектрика на основе PPLP с добавлением 20–30% нанодисперсного TiO₂ пробивное на-

пряжение составляет 130 кВ/мм, в то время как у исходного PPLP лишь 107 кВ/мм. Финансирование проекта в 2007 г. составило 500 тыс. USD.

Снижение потерь на переменном токе в ВТСП проводах 2-го поколения

Национальная Лаборатория в Лос-Аламосе (LANL) представила отчет по изучению потерь на переменном токе в одиночных ВТСП проводах 2-го поколения, в токонесущих элементах на их основе, а также в различных обмотках. Исследовались ВТСП материалы, полученные как путем напыления ВТСП слоя на немагнитную подложку по технологии IBAD (SuperPower), так и методом химического осаждения ВТСП на текстурированную ферромагнитную подложку (технология RABiTS, разрабатываемая компанией AMSC). Для проводников с текстурированной ферромагнитной подложкой, помимо потерь в ВТСП слое, возникают также гистерезисные потери в подложке, составляющие около 70% от всех потерь (при работе в магнитных полях 0,1 Тл). Бюджет проекта за 2007 г. составил 300 тыс. USD.

Высоковольтные ВТСП токоограничители

Компания AMSC совместно с Siemens, Nexans, LANL, University of Houston и Southern California Edison заявила о возможности создания высоковольтных ВТСП токоограничителей (115 кВ, 1200 А), способных снизить токи КЗ с 80 кА до 55 кА. Проект высоковольтного токоограничителя основывается на опыте разработки устройств для сетей 6-10 кВ. В январе 2007 г. компанией Siemens совместно с AMSC был успешно испытан однофазный токоограничитель резистивного типа на 2,25 МВА, 13 кВ [2].

Компания SuperPower совместно с ORNL уже несколько лет ведет работы над высоковольтными (138 кВ) ВТСП токоограничителями на основе ВТСП проводов 2-го поколения SuperPower. Уже созданы и прошли испытания концепт-прототип и однофазный альфа-прототип. Бета-прототип токоограничителя скоро должен будет пройти эксплуатационные испытания в сети American Electric Power. В 2007 г. был разработан проект системы охлаждения, оптимизированы рабочие характеристики проводника, проведены высоковольтные испытания узлов токоограничителя при криогенных температурах. Бюджет проекта за 2007 г. составил около 2,8 млн. USD.

ВТСП-трансформаторы

Waukesha Electric Systems (WES) совместно с ORNL продемонстрировали как техническую возможность, так и экономическую целесообразность ВТСП трансформаторов с мощностью 10 МВА и выше. Ранее был разработан, и успешно испытан прототип трехфазного ВТСП трансформатора мощностью 10 МВА (первичное напряжение 24,9 кВ, вторичное 4,2 кВ) на основе ВТСП проводников первого поколения. В 2007 г. ORNL и WES начали разработку специальной высоковольтной изоляции и токовых вводов, для того чтобы максимально уп-

ростить и удешевить конструкцию ВТСП трансформатора на 138 кВ. ВТСП трансформаторы должны быть конкурентоспособны по цене, весу, габаритам, затратам на эксплуатацию и сроку службы. Концепт ВТСП-трансформатора мощностью 18 МВА, охлаждаемого жидким азотом, показан на рис. 1. В таблице 1 приведено сопоставление капитальных затрат и расходов на эксплуатацию 18 МВА ВТСП и 24 МВА обычного трансформаторов в течение 30 лет. Бюджет проекта за 2007 г. составил 475 тыс. USD.

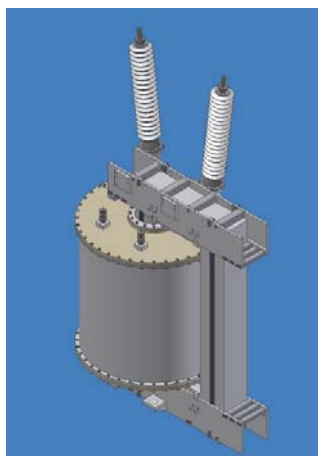
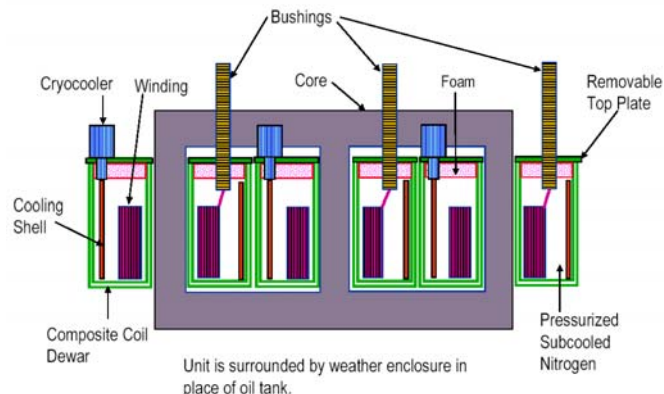


Рис. 1. ВТСП трансформатор ORNL и WES, и его однофазный прототип.

Таблица 1.

Затраты за 30 лет, тыс. USD	18 МВА ВТСП	24 МВА
Капитальные затраты	621	550
Потери в сердечнике	32,5	42,5
Омические потери	нет	150
Затраты на охлаждение	32	нет
Противопожарные меры	нет	100
Замена масла	нет	30
Обслуживание криокулеров	161	нет
Обслуживание криостата	20	нет
ВСЕГО	866,5	872,5

ВТСП электродвигатели

Компания Reliance Electric совместно с ORNL провели исследования экономической эффективности ВТСП электродвигателей. Ожидается, что ВТСП электродвигатели будут иметь в 2 раза меньшие потери по сравнению с обычными электродвигателями той же мощности. Расчет экономической эффективности показал, что ВТСП двигатель мощностью 5000 л.с. позволит сэкономить электроэнергию на 50 тыс. USD в год. Сегодня около 1/3 генерируемой в США электроэнергии расходуется для приведения в действие двигателей такой мощности. Объем финансирования работ в 2007 г. составил 500 тыс. USD.

ВТСП кабель Southwire

В 2006 г. компанией Ultera был успешно введен в эксплуатацию на подстанции в Биксби трехфазный ВТСП кабель с передаваемой мощностью 69 МВА, длиной 200 м, напряжением 13,8 кВ и рабочим током до 3000 А. Сейчас Ultera совместно с партнерами разрабатывает проект нового трехфазного ВТСП кабеля Southwire-Entergy триаксиального типа с рабочим напряжением 13,8 кВ, который должен заменить в Новом Орлеане высоковольтный кабель напряжением 230 кВ (рис. 2). Кабель будет состоять из трех секций общей длиной 1760 м, ввод кабеля в эксплуатацию запланирован на 2009 - 2010 гг. Основные параметры ВТСП кабеля приведены в таблице 2.

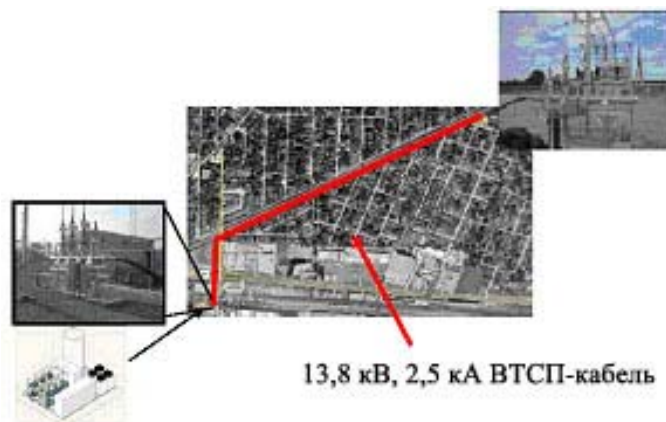


Рис. 2. Место для установки ВТСП кабеля Southwire-Entergy длиной 1,7 км.

Таблица 2.

Длина	1760 м
Рабочее напряжение	13,8 кВ
Передаваемая мощность	60 МВА
Число фаз	3
Количество соединительных муфт	2

В 2007 г. компанией Ultera был произведен целый ряд работ, направленных на дальнейшее развитие ВТСП кабельной технологии. Исследовалось влияние ухудшения вакуума в криостате кабеля на его работоспособность. Прошли испытания новые образцы криогенного диэлектрика Cryoflex, разработанные Ultera. Исследовались как различные образцы диэлектрика, так и короткие куски ВТСП кабеля, изготовленные с использованием Cryoflex. Про-

должились работы над системами криогенного обеспечения, криогеника ВТСП кабеля в Биксби была дополнена двумя криокулерами производства Q-drive на основе пульсационных труб с холодопроизводительностью в 1000 Вт при 77 К каждый (более подробно о них написано в [3]). Монтаж и системную интеграцию криокулеров осуществляла компания Praxair. Была разработана и испытана в ORNL соединительная кабельная муфта, ее установка в короткий отрезок ВТСП кабеля не привела к снижению его критического тока.

ВТСП кабель LIPA

Компании AMSC, Nexans, Long Island Power Authority и Air Liquide уже несколько лет занимаются созданием высоковольтного ВТСП кабеля для установки в сети Long Island Power Authority (LIPA), Нью-Йорк. Параметры ВТСП кабеля указаны в таблице 3.

Таблица 3.

Длина	660 м
Рабочее напряжение	138 кВ
Рабочий ток	2400 А
Число фаз	3
Передаваемая мощность	574 МВА
Максимальный ток КЗ	51 кА

За 2007 г. были изготовлены и доставлены к месту монтажа: три фазы ВТСП кабеля в индивидуальных криостатах, токовводные муфты вместе с их криостатами, изоляторы токовводов и прочее оборудование (рис. 3). Одна из фаз кабеля уже установлена в кабельном канале, монтаж остальных фаз и окончательная сборка ВТСП кабеля должны быть завершены к началу 2008 г. Система криогенного обеспечения, также была перевезена и смонтирована на месте установки кабеля. В течение нескольких месяцев проходили приемочные испытания криогеники, продемонстрированы приемлемые результаты. Выполнена большая часть работ по подготовке площадок под распределительные устройства на концах кабеля.



Рис. 3. Токовводные муфты ВТСП кабеля LIPA на площадке (слева) и вводы в кабельные каналы (справа).

Параллельно с работами по проекту LIPA компания AMSC разрабатывает проект высоковольтного кабеля LIPA-2 на базе ВТСП проводников 2-го поколения. Основными отличиями LIPA-2 от предшественника будут:

- Легко-разборный криостат, позволяющего при необходимости осуществлять ремонт кабеля без полного демонтажа фазы.
- Разработка соединительной муфты на напряжение 138 кВ.
- Ограничение тока КЗ самим ВТСП кабелем будет достигаться за счет использования ВТСП проводов типа 344S с высоким удельным сопротивлением.
- Соответствие требованиям Secure Super Grids на ограничение тока КЗ.
- Охлаждения высокоэкономичным азотным охладителем на обратном цикле Брайтона с холодопроизводительностью 20 кВт.

Объем финансирования за 2007 г. составил 7,12 млн. USD.

С.В. Шавкин, В.И. Щербаков

1. [Superconductivity for Electric Systems 2007 Annual Peer Review, USA, Virginia, Arlington.](#)
2. *Сверхпроводники в электроэнергетике, 4, №2, 8 (2007).*
3. *Сверхпроводники в электроэнергетике, 5, №1, 7 (2008).*

ВТСП УСТРОЙСТВА

AMSC и TECO-Westinghouse совместно разрабатывают мощные ВТСП синхронные генераторы для прибрежных ветряных электростанций

Компании American Superconductor (AMSC) и TECO-Westinghouse Motor Company (TWMC) объявили об объединении усилий в области разработки ВТСП генераторов большой мощности для прибрежных ветряных электростанций. AMSC и

TWMC получили государственное финансирование в рамках NIST's Advanced Technology Program, что позволило добавить еще 3,4 млн. USD к первоначально потраченным на НИОКР 6,8 млн USD. Создание ВТСП синхронных генераторов мощностью 10 МВт потребует проведения целого ряда НИР и НИОКР, направленных как на создание новых ВТСП проводов, так и на разработку технологии намотки из них. Работы будут проходить в тесном сотрудничестве с NIST, их продолжительность оценивается в 30 месяцев. Сроки появления коммерческих ВТСП синхронных генераторов 10 МВт класса



Рис. 1. О размерах ветрогенератора на 10 МВт можно судить по фотографиям установки мощностью 1,65 МВт. Это будет воистину циклопическое сооружение.

Ранее, компания Zenergy Power по заказу UK Department of Trade and Industry, спроектировала и изготовила опытный образец сверхпроводникового синхронного генератора мощностью 8 МВт с прямым приводом от ветряной турбины. Генератор был изготовлен из ВТСП провода первого поколения, производства Zenergy Power (см. Superconductors Week, v. 21, no. 5, 2007). В AMSC разрабатывает генератор на базе ВТСП проводов второго поколения. Отличительной особенностью синхронных генераторов с прямым приводом является низкая частота вращения (~ 11 оборотов в минуту) при высоком крутящем моменте. Оба генератора рассчитаны на напряжение в 6 кВ.

AMSC надеется, что ВТСП генераторы прямого привода для ветряных электростанций будут обладать более высоким КПД при меньших габаритах и стоимости по сравнению с традиционными генераторами. За счет замены медных обмоток ротора на

ВТСП и модификации статора, масса генератора может быть сокращена до 120 т, что в три раза меньше чем для обычных генераторов подобного класса. Ветряная энергетическая установка мощностью 10-12 МВт представляет собой циклопическое сооружение: ротор диаметром ~200 м смонтирован на башне высотой 250 метров. Наличие значительной массы на вершине башни приведет к росту стоимости металлоконструкций и негативно скажется на ветроустойчивости. Следует отметить также, что монтаж генератора массой в несколько сотен тонн на высоте более 200 метров будет сложной инженерной задачей. Сравнительно легкие ВТСП генераторы способны значительно упростить и удешевить конструкцию ветроэнергетических установок большой мощности.

А.А. Никонов

1. www.amsuper.com

КРИОГЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств

Сразу вскоре после появления первых опытных образцов сверхпроводниковых электротехнических устройств стало ясно, что криогенное оборудование, используемое в промышленности и для нужд физического эксперимента не подходит для охлаждения сверхпроводниковой электротехники как по уровню холодопроизводительности, так и по надежности и удобству эксплуатации.

В начале 20 века криогенное оборудование создавалось, в основном, для получения кислорода для нужд металлургии и химической промышленности. С развитием техники было также освоено получение в промышленных масштабах аргона, неона и гелия. Однако промышленные азотные и гелиевые ожижители – это сложные и громоздкие установки, требующие постоянного технического обслуживания высококвалифицированным персоналом, их холодопроизводительность намного превосходит потребности любых сверхпроводниковых электротехнических устройств и даже целых сверхпроводниковых подстанций. Исключение составляют лишь СПИНЭ с запасенной энергией в несколько сотен МДж и выше, а также ВТСП ЛЭП протяженностью более чем 1-2 км.

Бурный расцвет МР томографии (сейчас в мире производится более тысячи СП томографов в год) был бы невозможен без появления принципиально новых криогенных устройств - криокулеров, отличающихся компактностью, высокой надежностью и удобством в техническом обслуживании. Для достижения криогенных температур достаточно просто включить криокулер. От пользователя теперь не требуются познания в криогенной технике, все необходимые сервисные работы выполняют представители фирмы изготовителя с периодичностью раз

в полгода или реже. Сейчас криокулеры широко используются в различном лабораторном оборудовании, благодаря им существенно упростилась конструкция вакуумных крионасосов. Криокулеры в большом количестве производятся несколькими фирмами: SHI Cryogenics, Cryomech, Leybold и др. Существуют две конструктивные разновидности криокулеров: поршневые и на основе пульсационных труб, последние могут работать только в вертикальном положении. Криокулеры малой мощности обычно состоят из двух блоков: холодной головки, которая монтируется на охлаждаемом объекте, и гелиевого компрессора высокого давления, соединенного с головкой шлангами. Время непрерывной работы современных криокулеров достигает 10000 часов.

Однако у существующих криокулеров есть целый ряд недостатков: во-первых, хладопроизводительности единичного криокулера на гелиевом уровне температур недостаточно даже для охлаждения сверхпроводникового электротехнического устройства мощностью в несколько МВт во-вторых, КПД криокулера, работающего по циклу Гиффорда-МакМагона, существенно хуже, чем у классического ожижителя, работающего по циклу Брайтона, в-третьих, криокулеры (за исключением пульсационных труб) создают достаточно сильную вибрацию, борьба с которой требует дополнительных мер. Для охлаждения коммерческих сверхпроводниковых электротехнических устройств потребуется криогенное оборудование, которое по своей надежности и удобству эксплуатации должно, как минимум, не уступать существующим криокулерам, а по хладопроизводительности и КПД значительно превосходить их.

Развитие криогенного оборудования для охлаждения ВТСП электротехнических устройств идет по двум различным путям: созданию мощных пульсационных труб (компания Q-drive, США) и поршневых криокулеров с механическим приводом (компания Stirling Cryogenics, Голландия). Несомненным преимуществом пульсационных труб является почти полное отсутствие в них движущихся частей, что позволяет резко увеличить надежность устройства и увеличить интервал между работами по техническому обслуживанию. На сегодня, компания Q-drive предлагает целую линейку криокулеров на базе пульсационных труб, в том числе и 2S362K с хладопроизводительностью в 1 кВт (рис. 1). Криокулеры 2S362K успешно используются для охлаждения ВТСП кабеля в Биксби (Коламбус, США).

Чрезвычайно перспективными представляются работы по созданию пульсационных труб, работающих по циклу Стирлинга, что позволит достичь более высокого КПД, чем для криокулеров, работающих по циклу Гиффорда МакМагона. В США и Японии проектируются пульсационные трубы с хладопроизводительностью при 77 К в 5 кВт и даже в 20 кВт.



Рис. 1. Криокулер Q-drive 2S362K (1 кВт при 77 К).

Компания Stirling Cryogenics предлагает широкий модельный ряд криокулеров с механическим приводом, работающих по циклу Стирлинга, КПД которых более чем в 1,5 раза выше, чем у криокулеров, работающих по циклу Гиффорда МакМагона. Отличительной особенностью криокулеров Stirling Cryogenics является их модульная конструкция, если криокулер типа LPC-1 RL состоит из одного модуля с хладопроизводительностью в 1 кВт при температуре 77 К, то криокулер LPC-8 RL включает в себя восемь таких модулей, и его хладопроизводительность при 77 К достигает 8 кВт. За счет модульности достигается удобство в монтаже и техническом обслуживании. Компания Stirling Cryogenics разработала несколько семейств криокулеров с различными рабочими температурами и схемами охлаждения, что позволяет найти оптимальное криогенное решение для охлаждения практически любого ВТСП электротехнического устройства.

Семейство криокулеров LPC FF предназначено для создания систем циркуляционного охлаждения, в которых жидкий азот с температурой 65-77 К под давлением прокачивается через охлаждаемый криостат. Помимо криокулера в состав системы циркуляционного охлаждения входят буферный танк, криогенный насос и газификатор для создания избыточного давления (рис. 2). Криокулеры LPC FF успешно используются для охлаждения нескольких ВТСП кабелей.

Криокулеры серий LPC RL и LPC T RL используются для реконденсации азота и неона. Криокулеры LPC T RL выполнены в двухступенчатом исполнении, за счет чего достигается рабочая температура в диапазоне 26-36 К (для серии LPC RL рабочая температура составляет 65-77 К). Конструктивно обе серии криокулеров достаточно близки (рис. 4), с охлаждаемым криостатом они соединяются через криогенный трубопровод большого сечения, по которому испарившийся газ поступает в реконденсатор криокулера, а сжиженный газ самотеком стекает

ет обратно в криостат. Криокулеры серии LPC RL широко используются для охлаждения ВТСП токоограничителей и других ВТСП устройств с рабочей температурой 65-77 К.



Рис. 2. Система циркуляционного охлаждения Stirling LPC-2 FF (1700 Вт при 77 К).

Последняя разработка Stirling Cryogenics – криокулеры серии GPC предназначены для охлаждения до температуры 20-30 К путем принудительной циркуляции теплообменного газа (гелий). Криокулеры серии GPC имеют двухступенчатое исполнение, каждая из ступеней заканчивается теплообменником для охлаждения теплообменного газа, циркуляция которого по двум замкнутым контурам осуществляется при помощи криогенных насосов.

Температура теплообменного газа в первом контуре составляет 80 К, а во втором – 20-30 К. Криокулеры серии GPC предназначены для охлаждения сверхпроводниковых электрических машин и трансформаторов.



Рис. 3. Криокулер Stirling LPC-1 T RL (105 Вт при 26 К).

В таблице приведены основные характеристики криокулеров различных производителей, для криокулеров двухступенчатого исполнения указано два значения. Для криокулеров Stirling Cryogenics указаны характеристики самой маломощной и самой мощной модели в серии (параметры в скобках).

Марка криокулера	Рабочая температура	Холодопроизводительность	Потребляемая мощность
Рабочая температура 4,2 К			
Cryomech PT415	4,2/45 К	1,5/40 Вт	10,5 кВт
SHI Cryogenics RDK-415	4,2/50 К	1,5/35 Вт	7,2 кВт
Рабочая температура 20-30 К			
Leybold Coldpower 140 T	20 К	20 Вт	6,2 кВт
Leybold Coolpower 10 MD	20/80 К	18/110 Вт	6,5 кВт
Stirling Cryogenics LPC-1T RL (LPC-8T RL)	26 К	105 Вт (820 Вт)	11 кВт (90 кВт)
Stirling Cryogenics GPC-1 (GPC-4)	20/80 К	50/400 Вт (200/1600 Вт)	11 кВт (45 кВт)
Рабочая температура 77 К			
Cryomech AL600	80 К	620 Вт	15,5 кВт
Q-drive 2S362K	77 К	1000 Вт	21 кВт
Stirling Cryogenics LPC-1 FF (LPC-8 FF)	77 К	750 Вт (7400 Вт)	12 кВт (98 кВт)
Stirling Cryogenics LPC-1 RL (LPC-8 RL)	77 К	1000 Вт (8000 Вт)	11 кВт (88 кВт)

Ниже приведены типовые криогенные задачи, возникающие при создании различных сверхпроводниковых устройств, а также кратко описаны пути их решения:

ВТСП кабели – Исходя из теплопритоков и тепловыделений в кабеле на уровне 1-2 Вт на погонный метр, холодопроизводительность криогенной установки составит от 2 до 10 кВт в зависимости от конструкции и длины кабеля. Хладагент – жидкий азот с

температурой от 66 до 77 К циркулирует под давлением по замкнутому контуру. Криогенная установка расположена на одном из концов кабеля, если все фазы кабеля находятся в общем криостате, то должен быть предусмотрен канал для возврата жидкого азота. Если же каждая фаза кабеля заключена в свой собственный криостат, то возврат азота к криогенной установке производится через криостат одной из фаз (рис. 4). Следует обратить внимание на то, что гидравлическое сопротивление ВТСП кабеля сильно

возрастает с ростом его длины, если в ВТСП кабеле Олбани длиной 350 м давление хладагента составляло около 6 атм, то уже в 660 метровом кабеле Лонг-Айланде (LIPA) рабочее давление достигло 20 атм,

что делает создание ВТСП кабелей длиной свыше 1 км проблематичным без использования дополнительных криогенных насосов.

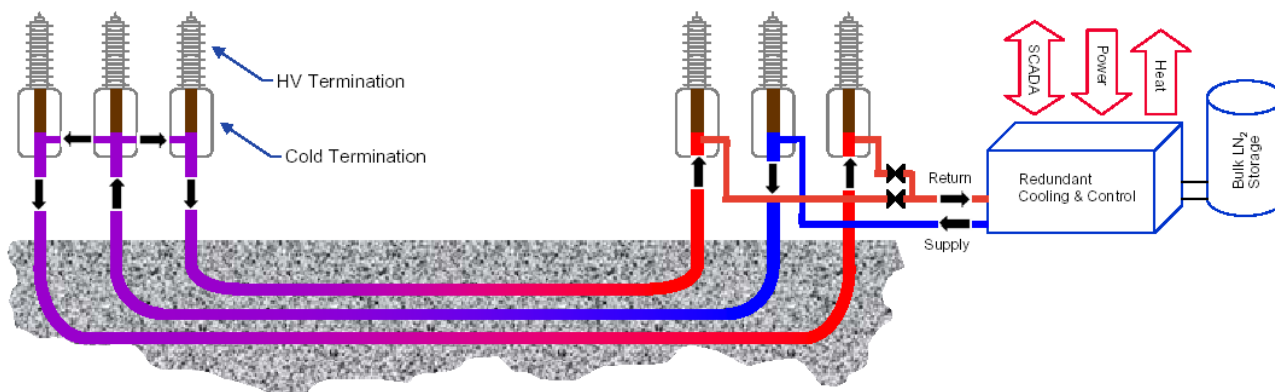


Рис. 4. Криогенная схема ВТСП кабеля LIPA.

ВТСП токоограничители – Теплопритоки по тоководам и тепловыделения, связанные с потерями на переменном токе в токоограничивающих элементах, можно грубо оценить в 0,3 – 1 кВт в расчете на 10 МВт номинальной мощности устройства. Дать точную оценку тепловыделений можно, лишь зная характер нагрузки в сети. Теплопритоки по криостату будут много меньше, чем тепловыделения, связанные с потерями на переменном токе, и ими можно пренебречь. Хладагент – жидкий азот при температуре 66-77 К.

ВТСП трансформаторы – Вплоть до появления ВТСП материалов 2-го поколения, создание ВТСП трансформаторов, работающих при температуре 77К, было сопряжено со значительными трудностями, связанными с сильной и анизотропной зависимостью критических свойств ВТСП проводников на основе Bi-2223 от магнитного поля. Для того чтобы достичь рабочей плотности тока в ВТСП обмотках, находящихся в магнитном поле с индукцией порядка 1 Тл, необходимо значительно снизить их рабочую температуру, что достигается путем охлаждения ВТСП обмоток криокулерами через теплообменный газ (обычно гелий). Появление доступных ВТСП материалов 2-го поколения позволит создать в ближайшем будущем трансформаторы с рабочей температурой 77 К и соответственно, с более простой криогеникой.

ВТСП электрические машины – В силу резкой полевой зависимости критических свойств ВТСП проводов на основе Bi-2223, обмотки электрических машин мощностью выше 1 МВт обычно работают при температуре 20-30 К, охлаждение ВТСП обмоток осуществляется криокулерами через теплообменный газ: в разработках Siemens неон, у AMSC гелий. Несмотря на дороговизну, охлаждение неоном имеет несомненный плюс: температура кипения жидкого неона составляет 27 К, что позво-

ляет организовать циркуляцию неона по принципу пар-лифта без использования криогенного насоса.

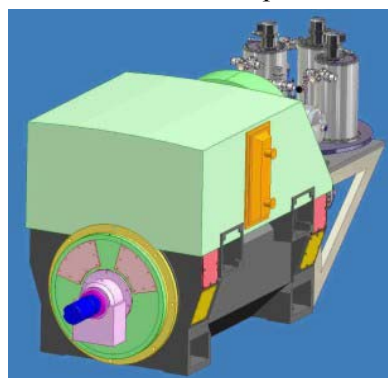


Рис. 5. ВТСП генератор Siemens мощностью 4 МВт и один из его криогенных модулей.

На рис. 5. изображен один из криогенных модулей ВТСП генератора мощностью 4 МВт, разработанного компанией CryoZone по заказу Siemens. Криогенный модуль состоит из охлаждаемого криокулера неоновый реконденсатор с буферным танком, и коаксиального криогенного трубопровода, проходящего сквозь вал генератора внутрь ротора. Жидкий неон подается по криогенному трубопроводу непосредственно в центр ротора, охлаждая ВТСП обмотки, затем газообразный неон возвращается в реконденсатор. Уплотнение на основе ферромаг-

нитной жидкости обеспечивает герметичность между вращающимся валом и неподвижным трубопроводом. Статор ВТСП генератора охлаждается еще двумя криогенными модулями аналогичной конструкции.

СПИНЭ – В обозримом будущем СПИНЭ с запасенной энергией большей нескольких сот кДж, могут быть изготовлены только из низкотемпературных сверхпроводников (обычно NbTi), охлаждаемых до температуры жидкого гелия. Для СПИНЭ с запасенной энергией до 20 МДж еще возможно охлаждение от криокулеров, тогда как более крупные установки потребуют собственного гелиевого оживителя.

В.И. Щербаков, В.В. Лобынцев

1. www.stirling.nl
2. www.cficinc.com
3. www.cryomech.com
4. www.shicryogenics.com
5. www.oerlikon.com/levboldvacuum/

Дефицит гелия на мировом рынке

Согласно сообщениям информационных агентств на мировом рынке в 2007 г. возник и постоянно возрастает дефицит гелия, что уже привело к 10% росту цен. Аналитики связывают возникший дефицит гелия с профилактическими работами на втором в мире по уровню запасов газа месторождении США, а также с падением производства на месторождениях в Алжире и Катаре. Гелий является побочным продуктом при добыче природного газа. Самым крупным мировым производителем гелия считаются США, где более половины добычи осуществляется в штатах Канзас и Техас. Гелий добывают также в Алжире, Катаре, России (Оренбург) и Польше.

Гелий используется для разнообразных целей, в том числе: 20% гелия расходуется на охлаждение сверхпроводящих магнитов в МР томографах, 17% применяется как инертная газовая среда, около 7% гелия тратится на воздушные шары. Сегодняшняя нехватка гелия вызвана резким увеличением спроса в Японии и ряде других странах, на фоне снижения добычи. Потребности промышленности и крупных научных проектов (ЛНС, ИТЕР) будут оказывать заметное влияние на рост и колебание цен на гелий.

В 2006 г. на мировой рынок поступило 160 миллионов кубических метров гелия. Около трети мировых поставок сегодня производится из федерального гелиевого резерва США. Кроме того, согласно акту о приватизации гелия 1996 г США должны выставить на продажу 850 из 867 млн. м³ гелия из федерального резерва. Если расход гелия продолжится в том же темпе, то весь резерв гелия будет исчерпан в течение 10-15 лет. По оценкам аналитиков рынок останется напряженным и к 2010 г. ожидается еще больший рост цен. Для стабилизации рынка необходимо как разрабатывать новые месторождения, так и принимать меры по сохранению запасов гелия.

Запасы гелия на Земле конечны и хотя атмосфера содержит около 19500 млрд. м³, его концентрация очень низка (~0.0005%), что делает получение гелия из атмосферы экономически невыгодным. Приблизительно 31 млрд. м³ гелия содержится в природном газе. К сожалению, большинство месторождений природного газа не содержит гелия в достаточной концентрации. В настоящее время в мире имеется всего 11 месторождений природного газа с содержанием гелия более 0,3 %, расположенных по большей части в США. Однако рост цен на гелий приводит к тому, что ожижение природного газа для извлечения гелия станет выгодным и для месторождений с концентрацией гелия ниже 0,3%. Мощности по получению гелия уже созданы на сравнительно бедных гелием газовых месторождениях в Алжире, Катаре и Австралии.

А.А. Никонов

1. *Superconductor Week, 21, n. 20, 5 (2007).*

КОНФЕРЕНЦИИ

24 - 27 марта 2008

The 2007 MRS (Materials Research Society) Spring Meeting

Сан-Франциско, США

Web: www.mrs.org

31 марта - 3 апреля 2008

European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2008)

Брюссель, Бельгия

Web: www.ewec2008.info

21 - 25 апреля 2008

Научно-промышленная выставка Hannover Messe

Ганновер, Германия

Web: www.hannovermesse.de

21 - 24 апреля 2008

IEEE PES (Power Engineering Society)

Transmission and Distribution Conference and Exposition 2008.

Чикаго, США

Web: www.ieeet-d.org

4 - 8 мая 2008

IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2008)

Мадрид, Испания

Web: www.intermagconference.com/intermag2008/

1 - 4 июня 2008

WINDPOWER 2008 Conference & Exhibition

Хьюстон, США

Web: www.windpowerexpo.org

9 - 12 июня 2008

MRS (Materials Research Society) International Materials Research Conference

Чунцин, Китай

Web: www.mrs.org

9 - 12 июня 2008

15th International Cryocooler Conference (ICC 15)

Лонг-Бич, США

Web: www.cryocooler.org

11 - 18 июня 2008

European Summer School on Superconductivity 2008

Пори, Финляндия

Web: <http://www.esas.org/>

21 - 25 июня 2008

22th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC-22) and International Cryogenic Materials Conference (ICMC 2008)

Сеул, Корея

Web: www.icec-icmc-seoul.org

<http://perst.isssph.kiae.ru/supercond>

Издатель РИЦ «Курчатовский институт»

(при поддержке ОАО «НТЦ электроэнергетики» и Фонда «Научный потенциал»)

Научный редактор *Н.А. Черноплеков*, член-корр. РАН,

научный руководитель ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

Редакторы *В.С. Высоцкий* vysotsky@gmail.com, *В.И. Щербаков* sherby@isssph.kiae.ru

Ответственный редактор: *М.П. Смаев* smayev@sci.lebedev.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *В.В. Лобынцев*, *А.А. Никонов*, *С.В. Самойленков*

С.В. Шавкин, *А.К. Чернышева* perst@isssph.kiae.ru,

Верстка *И.Л. Фурлетова*