

СВЕРХПРОВОДНИКИ

для электроэнергетики

Том 3 выпуск 6
декабрь 2006

Исследовательские центры
Провода Кабели
Трансформаторы

Фирмы
Генераторы
Токоограничители

Инвесторы
Накопители

ПРОРЫВ

ВТСП гидрогенератор. Совместный проект Zenergy Power и E.ON Wasserkraft

Zenergy Power plc (ZEN.L) - разработчик в области коммерческих применений сверхпроводящих материалов, сообщает об успешных результатах длительного сотрудничества с компанией E.ON Wasserkraft GmbH: принято решение установить первый в мире ВТСП гидрогенератор на коммерческой гидроэлектростанции в Хиршайде (Hirschaid) в Баварии (Германия).

Разработку и установку 1,25 МВт генератора финансирует Европейская Комиссия с целью улучшения эффективности источников возобновляемой энергии.

Гидрогенератор будет изготовлен из ВТСП материалов, на которые у Zenergy имеется патент и которые позволят изготовить гидрогенератор с уровнем эффективности выше 98%, что существенно лучше эффективности, достигаемой в существующих традиционных гидрогенераторах. Стоимость проекта 3,44 млн. евро, из которых 1,85 млн. евро внесет Еврокомиссия.

1,25 МВт генератор будет построен компанией Converteam (прежняя ALSTOM Power Conversion), используя ВТСП катушку компании Trithor GmbH, являющейся частью Zenergy. ВТСП генератор будет установлен взамен существующего традиционного гидрогенератора. Дальнейшее техническое обслуживание генератора берет на себя немецкая компания КЕМА, Силезский университет технологий и британская компания Vector Fields. Поддержку охлаждения будет осуществлять немецкая компания Stirling.

http://www.zenergypower.com/pdf/press-en/2006-10-23%20Hydro%20Power%20Generator%20Zenergy_en.pdf

ЗАРУБЕЖНЫЕ КОМПАНИИ

Hyper Tech Research, Inc. (США) – лидер в разработке MgB₂ проводов

www.hypertechresearch.com

1275 Kinnear Road

Columbus, OH 43212

Telephone: 614-481-8050

Fax: 614-481-4080

Президент Michael Tomsic

Telephone: 614-481-8050, ext. 105

E-mail: mtomsic@hypertechresearch.com

Партнеры Hyper Tech

- Ohio State University (OSU)
- University of Wollongong
- Florida State University
- CAPS - Center of Advanced Power Study (Florida State University, Tallahassee, Florida)

И далее...

Columbus Superconductors Spa – производитель MgB₂ проводов в Италии 5

Diboride Conductors Ltd – разработчик MgB₂ токоограничителей и токовводов 5

Диборид магния. Технологические аспекты 5

ПОЗИЦИЯ

Диборид магния – моя страсть и боль... 8

ВТСП УСТРОЙСТВА

Сверхпроводящие ограничители тока (COT). 1996 – 2006 гг. 10

ВЫСТАВКИ

Выставка “Криоген-Экспо” 13

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Темп и финансирование разработок 2G провода в США 14

- IEMM, Inc. (Innovative Environmental Magnets and Materials Inc.)
- MIT (Massachusetts Institute of Technology)

Финансирующие организации и ведомства

- Department of Energy
- Department of the Navy
- Department of the Air Force
- National Aeronautics and Space Administration
- National Institutes of Health
- State of Ohio

Компания Hyper Tech возникла сразу после открытия в 2001 г. японским ученым Akimitsu нового сверхпроводящего соединения – диборида магния MgB_2 с критической температурой 39 К. Компания поставила цель – разработать и производить диборидмагниевого провода с высокими характеристиками и низкой стоимостью. Вскоре после создания

Hyper Tech разработала и запатентовала процесс непрерывного формирования и заполнения (Continuous Tube Forming and Filling - CTFF) труб для создания сверхпроводящих MgB_2 проводов. Процесс включает изготовление провода, начиная с металлических лент, которые, протягиваясь через систему валков специальной формы, одновременно и в непрерывном режиме наполняются порошком MgB_2 , формируются в виде трубы и вытягиваются до необходимой толщины (см. рис. 1). Традиционно производители заполняют трубу фиксированной длины и затем вытягивают до необходимого диаметра, что имеет 2 недостатка: 1) труба заполняется материалом неоднородно по плотности и 2) для получения провода большой длины необходимо брать трубу все большего и большего диаметра.

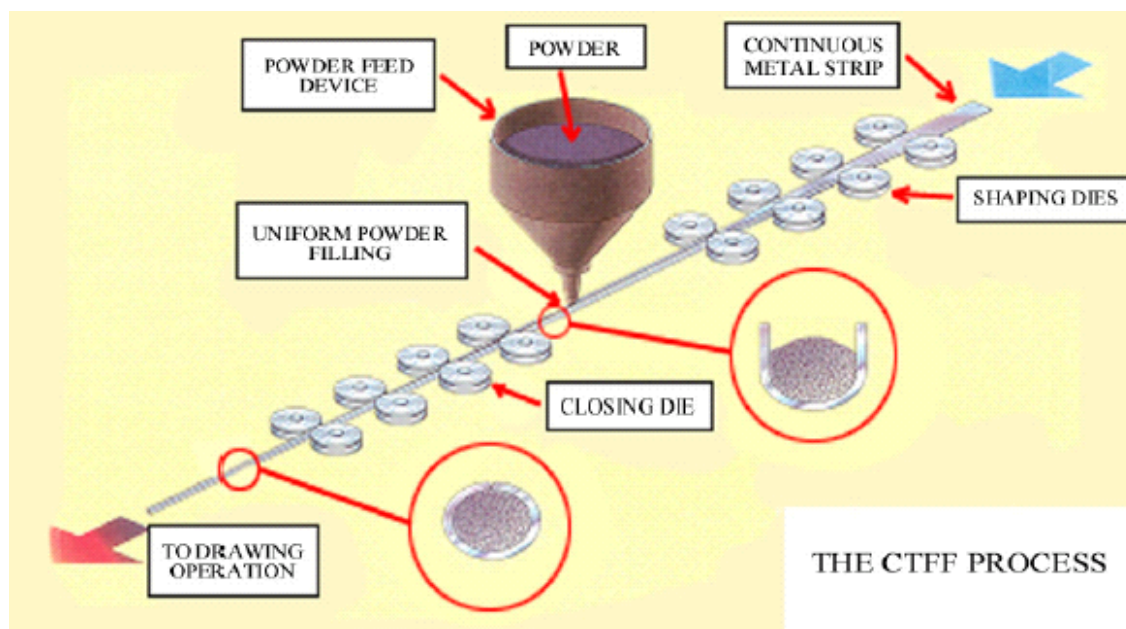


Рис. 1. Схема непрерывного процесса формирования металлической трубки и одновременного заполнения ее MgB_2 порошком с последующим вытягиванием провода.

В течение 4-х лет через контракты с Министерством обороны (DOD), НАСА, Национальным институтом здоровья (НИН), Массачусетским технологическим институтом и Университетом штата Огайо компания Hyper Tech получила в сумме более 3,5 млн. долл. В настоящее время Hyper Tech работает над проектами, связанными с разработкой и производством MgB_2 проводов и устройств на их основе, с общим объемом финансирования 2 млн. долл.

Финансируемые проекты

- Магнит для ЯМР томографии (проект с Национальным институтом здоровья)
- Трансформатор/Индуктор (проект от ВМС США)
- Мотор/Генератор (проект от НАСА)
- Статор (проект от НАСА)
- Рефрижератор на принципе адиабатического размагничивания (проект от НАСА)

- Применения в области физики высоких энергий (проект от Министерства энергетики)
- Будущие программы - токоограничитель, ондулятор.

Почему Hyper Tech выбрала MgB_2 ?

Первая причина ясна – этот материал обеспечивает характеристики и надежность, сравнимые или даже превосходящие существующие магниты при более низкой стоимости. Если сравнивать с постоянными магнитами, то мы имеем два потенциальных преимущества MgB_2 :

- возможность достижения типичных магнитных полей более 0,4 Т (до 1,5-2,0 Т) при более низких капитальных затратах на оборудование и с более низкой стоимостью эксплуатации;

- возможность достижения более высоких магнитных полей и большего размера зоны однородности магнитного поля.

В сравнении с НТСП магнитами стоимость эксплуатации MgB_2 катушек также более низкая из-за более высокой рабочей температурой (20 - 30 К) и связанной с этим стоимостью системы охлаждения. Кроме того, MgB_2 провода могут быть изготовлены как круглого, так и прямоугольного сечения, и имеют небольшой вес. Затраты на их изготовление значительно более низкие в сравнении с ВТСП лентами (как BSCCO, так и YBCO тонкопленочными проводниками).

Потенциальные применения – трансформаторы, индукторы, моторы, генераторы, токоограничители, ЯМР системы.

Hyper Tech имеет заводские помещения площадью 8600 кв. футов, на которых размещено оборудова-

ние для производства MgB_2 проводов различного диаметра и длины: оборудование для производства порошка, машины для процесса непрерывного формирования провода из MgB_2 лент, оборудования для вытягивания, прокатки и обжима (штамповки), печи для отжига и термообработки.

Производство Hyper Tech

Hyper Tech производит моножильные и многожильные MgB_2 провода в CuNi оболочке длиной от 1 до 4 км и диаметром 0,7 – 0,9 мм с 7 или 18 жилами. Плотность критического тока $J_c = 175000 \text{ A/cm}^2$ (20 К, 2Т). Для увеличения критического тока в магнитном поле MgB_2 провода легируют карбидом кремния (SiC), вводя добавки в исходный порошок. В легированных проводах J_c достигает 20000 A/cm^2 при 10 Т и 4.2 К.

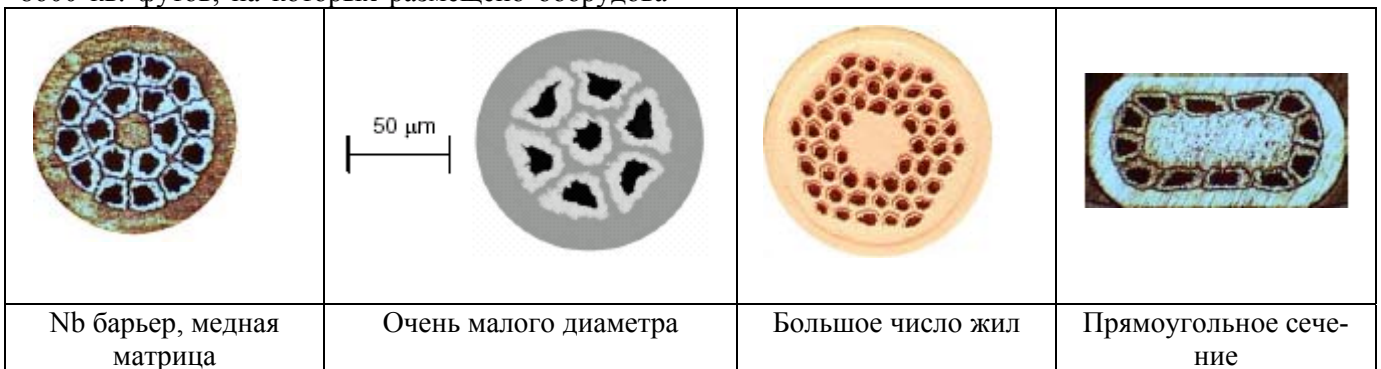


Рис. 1. Поперечное сечение многожильных MgB_2 проводов различных типов.

Для оценки качества проводов Hyper Tech изготовила соленоиды, генерирующие 2,4 Т (при 20 К), 1,8 Т (при 25 К) и 0,9 Т (при 30 К). Эти соленоиды удовлетворяют требованиям для многих применений. Генерируемые в них магнитные поля более высокие, чем в существующих открытых ЯМР системах на постоянных магнитах (~ 0,35 Т). Компания изготавливает соленоидальные и рейстрекковые катушки, освоив две технологии - “намотка-реакция” (“wind and react”) и “реакция-намотка” (“react and wind”). В августе 2006 года методом «реакция-намотка» была изготовлена испытательная соленоидальная катушка диаметром 52 см с высоким полем и током, предназначенная для ЯМР аппаратуры (рис. 2). Конечная цель – 0.5 – 1.5 Т магнит и 0.5-3.0 Т магнит для коммерческих ЯМР систем открытого и закрытого типа, соответственно.

Некоторые результаты Hyper Tech по контрактам

Магниты для ЯМР томографии (контракт с НИИ - Национальным институтом здоровья)

Компания изготовила испытательную катушку (482 витка) для ЯМР томографии:

- диаметр отверстия 52 см;
- высота катушки 3,8 см;

- многожильный (18 жил) провод $MgB_2/Nb/Cu/CuNi$ длиной 823 м;
- инженерная плотность тока, $J_e = 22 \text{ кА/см}^2$ при 20 К;
- магнитное поле $B_{coil} = 0,12 \text{ Т}$ при 20 К.



Рис. 2. Испытательная катушка для ЯМР томографии.

Трансформатор и индуктор (контракт с ВМС США – US Navy)

По контракту с ВМС США Нурег Тех разрабатывает трансформатор и индуктор для питания корабельного двигателя (см. рис. 3).

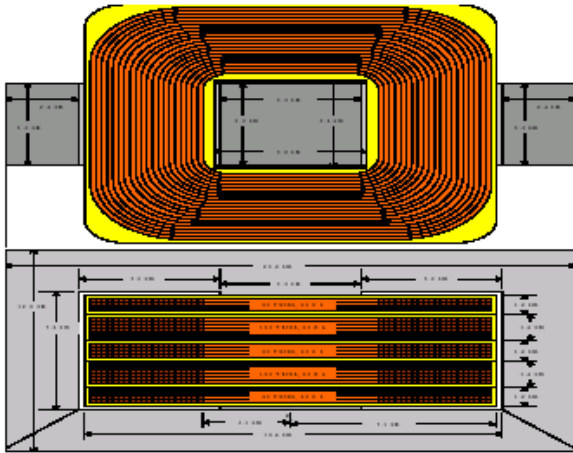


Рис. 3. Конструкция 12,4 кВА трансформатора (II фаза контракта с Navy).

На втором этапе разработки должны быть разработаны MgB₂ провода с низкими потерями на переменном токе и демонстрационная катушка для 12,4 кВА трансформатора, а на третьем этапе – 3-х фазный 3-5МВА трансформатор.

Катушки для моторов и генераторов (контракт с NASA)

По контракту с NASA Нурег Тех разрабатывает демонстрационный генератор. Проект называется «Разработка MgB₂ сверхпроводящих катушек для авиационных электромоторов и генераторов». На втором этапе проекта будет изготовлен ротор полностью из MgB₂. Конечная цель – 4-х полюсный ротор из 2 км провода для вставки в 2 МВт генератор. Другой проект, выполняемый Нурег Тех по контракту с NASA, называется «Диборидмагниевоый сверхпроводящий статор для систем электродвижения» (см. рис. 4).



Рис. 4. Сегмент статорной катушки, намотанной из семижильного MgB₂ провода ($J = 310\,000\text{ A/cm}^2$ at 20 K)

Магниты для ускорителей (контракт с Министерства энергетики США – DoE)

По гранту, полученному от Министерства энергетики США, Нурег Тех разрабатывает MgB₂ магниты для применений в ускорителях. Цель разработки – увеличить критический ток в полях 3-5 Т, увеличить число жил в проводе, увеличить соотношение сверхпроводник/нормальный металл, улучшить стабильность.



Рис. 5. Двухметровый кабель, скрученный из 9 проводов (шаг скрутки 5 см).

Результаты испытаний кабеля (рис. 5), проведенных в Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN, Италия), представлены на рис. 6.

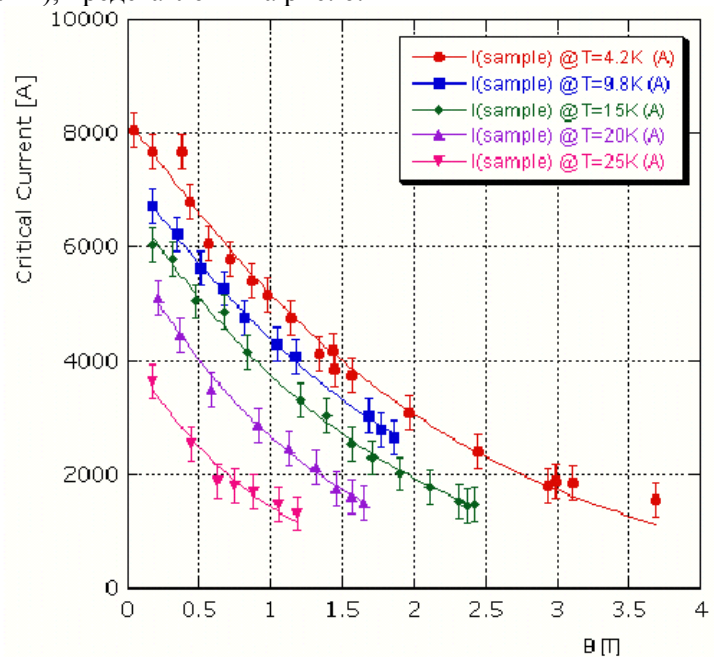


Рис. 6. Зависимость критического тока от магнитного поля при температурах 4,2 К, 9,8 К, 15 К, 20 К и 25 К в MgB₂ кабеле, оптимизированном для применений в устройствах для физики высоких энергий.

В устройствах физики высоких энергий амбиции Нурег Тех не ограничиваются ускорителями, а тянутся и к термоядерному реактору. В надежде встроиться в ITER Нурег Тех продемонстрировала характеристики своих проводов в температурных условиях этого реактора.

Ограничители токов

Нурег Тех разработала и изготовила MgB₂ многожильный провод специально для ограничителей тока. Провод был успешно испытан сотрудниками Cambridge Univ. и компании Rolls Royce plc (Великобритания) при токе в импульсе 700 А.

Планы на будущее

Нурег Тех планирует включиться в разработку ондуляторов для источников синхротронного излучения, а также магнитов для левитирующих устройств.

В настоящее время Hyper Tech достигла производительности до 250 км проводов в год и планирует увеличить ее к 2007 году до 500 - 800 км/год (при длине в куске 10-20 км), к 2008 году – до 3000 – 5000 км/год (при длине куска – 30-60 км), к 2009 году - 10000 - 15000 км/год.

По материалам

- сайта www.hypertechresearch.com и презентации Hyper Tech на ASC2006
- IEEE Trans. Appl. Supercond. 16, 1445 (2006)

Columbus Superconductors Spa – производитель MgB_2 проводов в Италии

Website: <http://www.columbussuperconductors.com>

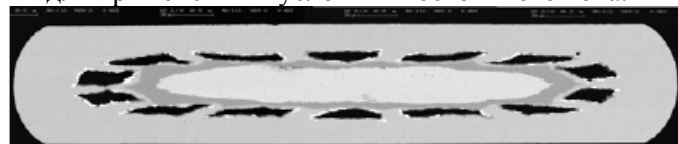
Columbus Superconductors была основана в феврале 2003 г. в Genova (Италия) на основе кооперации исследовательского института (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - INFN), группы из частной компании Ansaldo Superconduttori Spa и 6 исследователей. Все они теперь стали основными держателями акций компании. Цель компании – исследования, разработка, производство и продажа проводов, лент и кабелей на основе сверхпроводящего диборида магния.

На сегодняшний день компания производит:

1) транспонированные многожильные ленты для применений в условиях переменного тока;



2) стабилизированные медью многожильные ленты для применений в условиях постоянного тока.



COLUMBUS изготавливает MgB_2 проводники различной формы (круглые, плоские), различных поперечных размеров и длин, с различной оболочкой (немагнитной, с высоким электрическим сопротивлением). Проводники позволяют изготавливать катушки методом «реакция-намотка». Стандартная длина кусков проводников – 1,6 км. К концу 2005 года компания изготовила и поставила заказчикам 20 км MgB_2 ленты. К концу 2006 года компания переведет свое производство на промышленный уровень с производительностью 20 км/месяц и сможет его увеличить до 100 км/месяц, если это потребует. Длина кусков будет увеличена до 7 км.

MgB_2 проводники могут применяться в токоограничителях, трансформаторах, магнитах с большим внутренним каналом, в устройствах магнитной сепарации и ЯМР магнитах.

Параметры стандартных MgB_2 лент, стабилизированных медью, компании Columbus

Поперечное сечение, мм ²	3,6-0,65	
Критический ток, I _c , А	30 К, собственное поле	222
	27,5 К, собственное поле	330
	20К, 1Т	220

По материалам сайта

<http://www.columbussuperconductors.com>

Diboride Conductors Ltd – разработчик MgB_2 токоограничителей и токовводов

Компания Diboride Conductors основана в Cambridge (Великобритания).

Web site <http://www.debore.biz>

Контакт information@diboride.biz

Цель компании – поиск инновационных идей в разработке сверхпроводящих устройств на основе MgB_2 – провода, моторы, магниты, различные устройства и приборы. Компания имеет свои производственные площади.

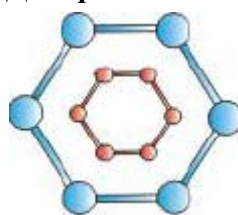
В настоящее время Diboride Conductors сосредоточила усилия на двух применениях – токоограничители и токовводы.

По разработке прототипов токоограничителей для использования в электродвигателях морских судов Diboride Conductors имеет общий проект с компанией Rolls Royce plc и Кембриджским университетом. Разрабатываемый токоограничитель будет меньших размеров и более быстродействующим в сравнении с ограничителями, разрабатываемыми для распределительных и передающих электросетей. Работа поддерживается по контракту с UK Department of Trade and Industry (DTI) - «*Superconducting fault current limiter for electrical marine propulsion (SuFCLEMP)*»

Разрабатываемые относительно дешевые MgB_2 токовводы предназначены для более стабильной работы и экономии электроэнергии в результате замены существующих (работающих на жидком гелии) токовводов в ЯМР сканерах госпиталей и лабораторных ЯМР установках.

По материалам сайта <http://www.diboride.biz>

Диборид магния. Технологические аспекты



Диборид магния - тугоплавкое вещество, практически не спекающееся при атмосферном давлении вплоть до температуры 1100°C [1]. Это обстоятельство затрудняет полную реализацию

потенциала этого сверхпроводника в технической сверхпроводимости: например, пока нерешённой задачей является получение объёмных образцов с хорошим контактом между частицами (хотя в последнее время сообщается о различных вариантах

решения этой проблемы). Как следствие, критический ток и критическое поле объёмных образцов MgB_2 пока ниже рекордных величин, полученных на высококачественных плёнках этого сверхпроводника: $\mu_0 H_{c2} > 60$ Тл, $j_c(4,2\text{К}, 8\text{Т}) > 10^5$ А/см², $j_c(4,2\text{К}, 0 \text{Тл}) > 3 \cdot 10^7$ А/см² [2].

Процесс получения плёнок MgB_2 , однако, затруднён высокой летучестью магния. Получение покрытий диборида возможно только в довольно узком технологическом окне, ограниченном при повышенном давлении магния конденсацией твердого или жидкого магния, а при пониженном давлении - разложением MgB_2 на другие бориды (см. рис.1). Чем выше температура осаждения, тем выше давление магния, необходимое для обеспечения устойчивости диборида. Так как большинство процессов получения плёнок осуществляется при пониженном давлении и высокой температуре, означенное обстоятельство входит в некоторое противоречие с технологией. Но есть и технологический плюс: в заштрихованной области реализуется удобная ситуация, так как избыток летучего компонента уходит в газовую фазу, а в плёнке остается лишь стехиометрический MgB_2 . Таким образом, контроль состава сводится только к поддержанию некоторого избытка магния ($x_{\text{Mg}}/x_{\text{B}} \geq 1/2$), ограниченного сверху давлением насыщенного пара Mg над смесью $\text{MgB}_2 + \text{Mg}$.

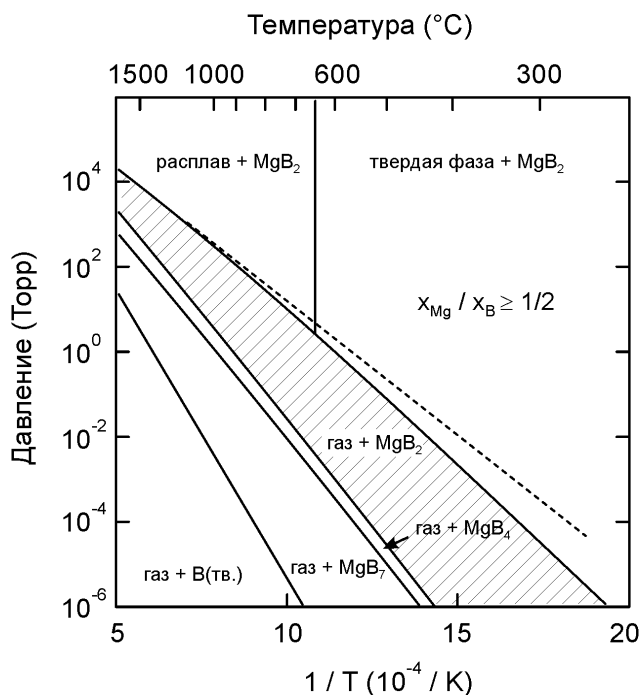


Рис. 1. Условия роста стехиометрических плёнок MgB_2 (заштрихованная область) на основе термодинамических расчетов [3]. Пунктиром показана зависимость давления Mg над металлическим магнием [4].

Авторы обзора [4] разделили методы получения пленок MgB_2 на три группы.

1) *Высокотемпературные* методы сводятся к обработке в парах Mg предварительно нанесённых плёнок бора в замкнутом объёме при температуре 850°C и выше. Плёнка бора может быть при этом получена

любым удобным способом (лазерное осаждение, испарение, CVD, ...). Высокая температура роста обеспечивает высокое кристаллографическое совершенство плёнок MgB_2 , T_c около 39К и плотность критического тока j_c выше 10^7 А/см².

2) *Среднетемпературные* методы заключаются в обработке при температуре около 600°C плёнок-предшественников (прекурсоров). Плёнки-прекурсоры получают также разными способами при температурах от комнатной до 300°C, они могут содержать смесь Mg , B и MgB_2 или быть составленными послойно из этих компонентов. Избыточный магний при температуре ~ 600°C улетучивается, а в плёнке образуется сверхпроводник. В такой технологии требуется точный контроль времени и температуры отжига, так как потеря слишком большого количества магния приводит к распаду MgB_2 . Полученные этим способом образцы существенно уступают в качестве высокотемпературным, нередко являются аморфными, а T_c в них достигает лишь 34К.

3) В *низкотемпературных* методах рост пленок диборида магния реализуется при температуре ниже 300°C. При этих условиях летучесть магния существенно понижена, однако большое внимание приходится уделять обеспечению достаточно высокого вакуума, в противном случае магний легко окисляется до оксида (MgO). T_c плёночных образцов, полученных при низких температурах, достигает 36К.

Интересной модификацией высокотемпературного процесса является т.н. гибридное физикохимическое осаждение из паровой фазы (HPCVD), разработанное американскими исследователями [5]. Осаждение в этом методе осуществляется на подложку, рядом с которой расположен металлический магний, создающий необходимое давление пара (рис. 2). Осаждение проходит при 700-760°C в потоке водорода при давлении 100 Торр. Бор в плёнку поставляется из диборана (B_2H_6), как в методе CVD (а так как магний фактически испаряется термическим нагревом, метод назвали "гибридным"). Таким образом, осаждение плёнки проводят непосредственно в парах летучего компонента в условиях, отвечающих области стабильности MgB_2 .

В начале 2000-х плёнками MgB_2 заинтересовались в первую очередь для их применений в сверхпроводниковой электронике, в поисках альтернативы ниобию. Плёнки для электроники получают, как правило, на монокристаллических подложках. В качестве материала подложки для MgB_2 хорошо зарекомендовал себя карбид кремния (SiC), который не вступает в химическое взаимодействие с MgB_2 . Помимо этого, гексагональная решётка 4H-SiC ($a = 0,3073$ нм) имеет хорошее структурное соответствие с решёткой MgB_2 ($a = 0,3086$ нм) в плоскости (0001). Рост плёнок на другой популярной подложке - сапфире - часто приводит к образованию на интерфейсе

примесных фаз (MgO и MgAl_2O_4); в остальном этот материал также позволяет получать эпитаксиальные плёнки высокого качества.

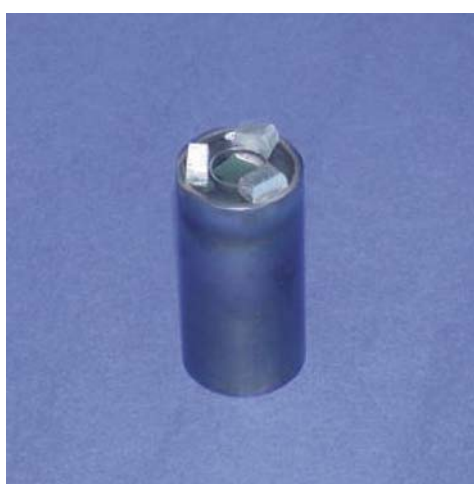
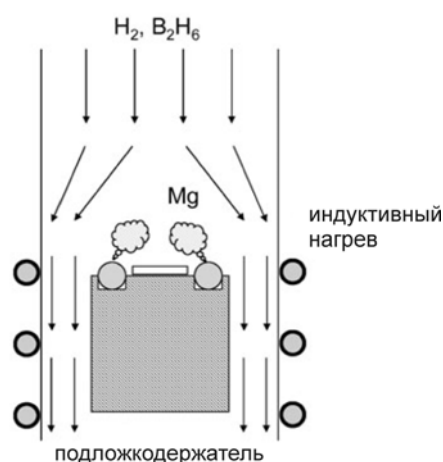


Рис.2. Схема процесса HPCVD [3,5] и фотография держателя подложки [6].

Большое внимание при синтезе плёнок MgB_2 уделяют качеству границ зерен сверхпроводника. Чувствительным критерием тут является отношение величины электросопротивления плёнки при комнатной температуре к сопротивлению при 50 К (RRR - residual resistivity ratio). У плёнок с хорошим контактом значение RRR довольно большое (продемонстрированы величины RRR выше 80). В таких образцах (а это, как правило, чистый диборид магния) получены рекордные критические токи в собственном поле (около $3,5 \cdot 10^7$ А/см² при 4 К), но полевая устойчивость сравнительно невысока. Критическое поле достигает ~ 5 Т (H//c) и 20 Тл (H//ab) при 10 К (такие же величины характерны для монокристаллов MgB_2). Плёнки с высокой величиной RRR имеют наименьшее поверхностное сопротивление R_s , что важно для СВЧ применений сверхпроводников.

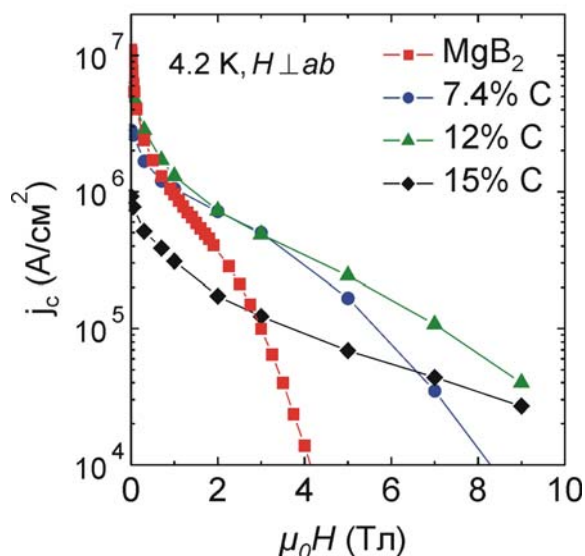


Рис. 3. Полевая зависимость критического тока плёнок "чистого" и допированного углеродом диборида магния [6]. Допирование плёнок MgB_2 углеродом (для этого в газовую фазу процесса HPCVD добавляют летучий комплекс магния с циклопентадиенилом) приводит к значительному усилению силы пиннинга и критического поля [6]. При тех же 10 К достигнуты величины 20 Тл для H//c и более 40 Тл для H//ab [7]. RRR при этом падает до 1-2. Критический ток в собственном поле понижается на порядок (при 15% углерода), но при $\mu_0 H_{c2} > 1-4$ Т превышает быстро падающий с полем критический ток "чистого" MgB_2 (рис. 3).

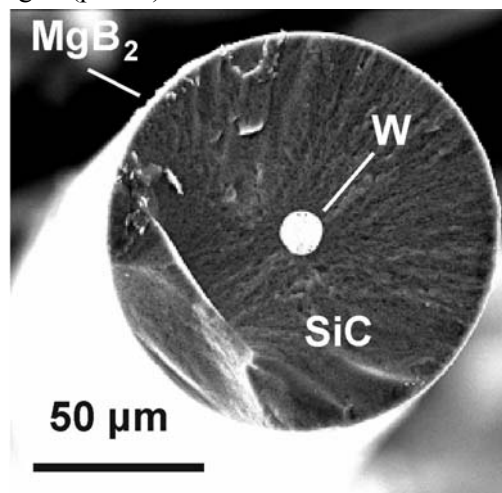


Рис. 4. Покрытие MgB_2 на волокне из SiC, выращенном на вольфрамовой нити.

В последнее время всё больше внимания уделяют получению покрытых проводников на основе MgB_2 . Поликристаллические покрытия толщиной в несколько микрон получены на подложках из нержавеющей стали [6], меди [8], гибких лентах из $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$, волокнах SiC [6] (рис.4). Получены высокие T_c , H_c , а в некоторых случаях и j_c . В большинстве случаев речь пока идёт о демонстрационных образцах сантиметровой длины, осаждённых методом HPCVD. Большую активность в этой области

проявляют всё те же американцы и китайцы из Пекинского университета.

В заключение стоит отметить чувствительность плёнок MgB_2 к воздействию воды при комнатной температуре [6,9]. Показано что плёнки, выращенные методом HPCVD и помещенные в воду, растворяются и деградируют со временем (за 2,5 часа T_c снижается на 3К). Плёнки, полученные термическим испарением, деградируют медленнее, однако, уменьшение толщины плёнок наблюдается в этом случае тоже.

С.Самойленков

1. *Dancer Does Magnesium Diboride Sinter?* (<http://users.ox.ac.uk/~lina1028/ASC2006.pdf>)
2. *Iwasa et al, IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16**, 1457, (2006)
3. *Xi et al, Supercond. Sci. Technol.* **17**, S196, (2004)
4. *Физические величины, М: Энергоатомиздат, 1991, стр. 257, 261*
5. *Zheng et al, Nature Materials*, **1**, 1 (2002)
6. *Xi et al, Thin Film RF Workshop, октябрь 2006, Падуа, Италия* (www.lnl.infn.it/~master/slideshow/tuesday/Xi.ppt)
7. *Ferdeghini et al, IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 3234, (2005)
8. *Li et al, Supercond. Sci Technol.* **19**, 1196, (2006)
9. *Cui et al, IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 224, (2005)

ПОЗИЦИЯ

Ниже – интервью с Евгением Павловичем Красноперовым, д.ф.-м.н, начальником лаборатории ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт»

Диборид магния – моя страсть и боль...

Давайте сначала о страсти...

MgB_2 чуть-чуть задержался с рождением, пропустив вперед ВТСП материалы. Если бы его открыли чуть раньше ВТСП, ученый мир охватил бы тот же ажиотаж, что и с памятным открытием ВТСП. Его критическая температура 39 К, почти вдвое выше, чем у сверхпроводников, известных до появления ВТСП. Относительно низкая анизотропия, простой химический состав, дешевизна исходных составляющих для его синтеза – все это заставило бы ученых и инженеров цепко ухватиться за него, и, скажем, проект термоядерного реактора стал бы существенно дешевле сегодняшней пугающей цифры и, может быть, надежнее. Но все это при условии, что в его разработку вложили хотя бы 2-3% средств, затраченных миром на разработки ВТСП.

Но у ВТСП материалов критическая температура значительно выше и это – существенное преимущество?

Конечно, температура выше. Но давайте посмотрим, при какой температуре реально работают сегодняшние прототипы ВТСП устройств. Это 20-30

К. Другие качества ВТСП материалов мешают ему работать при температуре ближе к критической. Возьмем ту же анизотропию критических токов для различных направлений магнитного поля к кристаллографическим осям. Анизотропия – это гигантская проблема в ВТСП висмутовой системы, где коэффициент анизотропии 20-30. Хотя в этой системе большие критические поля, но из-за высокой анизотропии сложно сделать провод, способный работать в ситуации больших магнитных полей. Для уменьшения анизотропии приходится снижать рабочую температуру до 20-30 К. И вот вам потеря преимущества высокой температуры.

В MgB_2 тоже есть небольшая анизотропия, но она составляет 2-3. И есть возможность снизить, воспользовавшись уже имеющимся опытом НТСП ниобиевой технологий. В ниобий добавили примесь, затем сделали замечательный «грязный» сверхпроводник Nb-Ti. И вот года 2 назад сделали грязный диборид магния - анизотропия еще уменьшилась, токи возросли. Правда, еще дебатировался вопрос, куда именно девать эти примеси. Сначала примесь «садили» неуправляемо, куда сядет. Теперь накопили много данных, но пока каждый автор интерпретирует результат по-своему, единой точки зрения нет, но во всех экспериментах примесь улучшает качество диборида магния. Уже сейчас грязный материал дает критическое поле до 70Тл. Причем, если у чистого диборида магния сопротивление – 4 мкОм, то у грязного оно возрастает почти в 10 раз. Материал доводят почти до уровня нестабильности - именно на таком материале получили 70 Тл. Но вот задача – он нестабилен и живет недолго. С другой стороны, такие рекордно высокие поля в практических устройствах пока не востребованы.

Ваша страсть понятна, в чем же причина вашей боли?

У нас, в Курчатовском давно и успешно занимались сверхпроводниками. Мы, наряду с бочваровцами, причастны к серийной технологии станда ниобия, на который сейчас ориентирован термоядерный реактор ITER. Потому сразу оценили перспективу диборида магния. Я с энтузиазмом включился в его разработку.

Для формирования нужной структуры необходимо делать очень плотный материал, а, значит, нужно прессовать порошок диборида магния в горячем состоянии и при высоком давлении. Создать высокие давления при традиционном волочении не удастся. Родилась идея магнитного обжатия. К тому же, в Курчатовском имелось необходимое оборудование – установки высоких импульсных магнитных полей. Можно сказать, мы на коленках провели магнитное обжатие при комнатной температуре, получили первые образцы провода не более метра длиной. Далее требовалась существенная модернизация установки для осуществления обжатия про-

тяжелых образцов в горячем состоянии. Принципиально такой процесс разработать можно, но нужна существенная модернизация установки. Вот и первая боль – где деньги?

Мы получили небольшой грант из фонда РФФИ на первые исследовательские работы, на технологию уже трудно получить академический грант, а диборид магния – это не столько научные изыскания, сколько хитрая технология. Из-за отсутствия финансовой поддержки мы приостановили развитие метода. Патента нет... Так что результат наших усилий по магнитному обжатию – статья в “Superconductors Science and Technology” 17, S274 (2004), имеющая, к удовлетворению авторского тщеславия, высокий индекс цитируемости. Но и, конечно, опыт работы с диборидом магния. Если появятся финансы, этот опыт будет весьма полезен.

Поделитесь своими технологическими тайнами с читателями бюллетеня?

Весьма привлекательна технология сжатия с помощью Z-пинча. Идея простая – берете трубку, в нее помещаете порошок диборида магния или смесь его компонентов, нагреваете заполненную трубку, скажем, постоянным током градусов до 900, а затем коротким импульсом в 1,5 МА обжимаете. Давление в 10 кбар обеспечено. Но пока реализации этой технологии препятствуют банальные трудности... аргона нет, тефлона нет, мастерских нет, пятое-десятое... Эксперименты с Z-пинчем ждут своего часа.

Конечно, как известно, часто успех разработки определяется правильно поставленными вопросами. Вот наш небольшой опыт – в возникших вопросах. Ответы можно искать вместе с заинтересованными читателями.

Важный вопрос (он стоит и решается и в ВТСП разработках) – как качественно соединять между собой отдельные куски провода. В традиционной технологии сверхпроводящего провода работают с проводами, состоящими из тончайших жил. Мы убеждены, что из диборида магния нужно делать стержни диаметром 2- 3 мм. Такой стержень может нести ток до 10кА. Пусть стержень будет иметь длину несколько метров. Как сконтактировать стержни между собой? Мой аспирант Вадим Гриненко стал добавлять в месте стыка избыток магния. За счет градиента концентрации магния (локального избытка в месте стыка) идет его диффузия, и место стыка зарастает. Как создать необходимый избыток? Сделаем куски провода слабо контактирующими (гранулки MgB_2 почти не контактируют, скажем, на пороге перколяции) и проведем отжиг при весьма средней температуре (где-то 600°C) в условиях избытка магния - и все – контакт хороший. Проблема решена. Правда, этот метод уже – не тайна. Другие разработчики (в частности, американцы) тоже догадались до этой относительно

простой технологии при решении проблемы меж-гранульных контактов.

Другой вопрос связан с разнозначными толкованиями оптимальной позиции расположения примеси в решетке MgB_2 . Когда вводите примесь, получаете дефекты в основном в структуре магния. Решетка бора не нарушена. А вот, судя по всему, можно и не вводить примесь, а просто формировать структуру с дефектами в структуре бора, т. е. делать синтез в условиях избытка магния. Если немного пофантазировать... Вы имеете слой магния, осаждаете на него тончайший слой бора, например, толщиной в пару мкм, потом снова - слой магния. Тогда при синтезе решетка начинает расти с дефицитом бора и избытком магния. Это недавно возникший метод – инфильтрации. Все это можно сделать довольно примитивно. Берете крупные гранулы магния и ультрадисперсный порошок бора (по нынешней терминологии – нанопорошок), и все это перемешиваете. (К слову, ультрадисперсные порошки были получены 30-40 лет назад в Курчатовском по заказу МинАтома). Таким образом, вы получаете гранулы магния, окруженные слоями порошка бора (с дефицитом стехиометрического состава). Все это спекаете. В результате критическая температура понижается, а критические поля растут. Уже на первых образцах при температуре 16К критическое поле достигло 12Т. Если, как мы надеемся, удастся доказать, что диборид магния с дефектной по бору решеткой дает хорошие результаты, то и не придется вводить примесь и искать ей оптимальное место. Ко всему, магний - хороший проводник, при его избытке такой материал сможет выполнять и функцию неплохого стабилизатора. Получим хорошие провода.

Наш результат с дефектной по бору решеткой очень многообещающ. Поэтому сидим и на коленках трем порошок. Ведь российского производства диборид-магниевого порошка нет. Купить за рубежом – «Где ж деньги, Зин?». Конечно, для хорошей технологической разработки многое надо. Чтобы создать тонкий слой порошка, нужен коллоидный метод, нужны чистые комнаты, чистые исходные материалы и т. д. Необходима модернизация имеющегося или закупка современного оборудования. И этого мало – современное оборудование требует квалифицированного обслуживания, необходимо обучать кадры. Задач много. Чтобы их решать, нужны энтузиазм (он, кажется, есть) и хорошее финансовое обеспечение (хотелось бы верить, что будет).

Кто еще в России пробует силы в диборидмагневой технологии?

Насколько я осведомлен, серьезных технологических разработок в России нет. Хотя отдельные образцы, судя по публикациям, делают и исследуют в Черноголовке (ИФТТ РАН).

За рубежом не упустили шанс? Существуют ли компании, производящие диборид магния в коммерческих количествах?

Да, это так. У них в крови – ориентация на частный успех. Каждый ищет свой шанс, свою, не занятую нишу для коммерческого успеха. Поскольку к моменту открытия диборида магния все сколь-нибудь перспективные ниши в ВТСП уже были прочно заняты, народ ухватился за новый материал, оценив его дешевизну и относительно простую технологию синтеза. К тому же, рискованные проекты там имеют шанс на государственную поддержку. Та же теперь лидирующая в диборидмагниевого технологии американская компания Nureg Tech собрала от правительственных ведомств на предварительные разработки до 3,5 млн. долл. Сразу появилась компания Alfa Aesar, выпускающая исходный MgB_2 порошок – покупай и делай провод. За MgB_2 ухватились и большие коллективы в Японии, Китае. ВТСП понадобилось 20 лет до первого коммерческого провода, пока еще очень дорогого. А вот MgB_2 ... 3 года и сразу в продаже коммерческий провод по цене несколько долл. за метр. Структура то простая.

А почему китайцы пробуют и пленочную структуру для MgB_2 провода, если так уж хороши массивный провод?

У китайцев диборидом магния занимается море организаций и пробуют разные варианты технологий. Принципиально не вижу специальной потребности сделать не объемный, а пленочный провод. Те же китайцы опубликовали данные, что из диборида магния надо делать провод диаметром 1,5 мм. Может нужны и пленочные. Главное, в каких целях будет использоваться провод. Хотя, например, для магнитных экранов пленочные образцы – это хорошо. В ситуации с ВТСП – есть и провод, и лента, и массивная керамика. И все находит свое оптимальное применение: из массива стали делать постоянные магниты с захваченным потоком и при 15 К достигли рекордного для ВТСП поля в 16 Тл. Конечно, получить магнит еще не значит, что вы научились его использовать. Вы сформировали магнит, поместили в криокуллер, охладили, внешним полем, намагнитили и используйте, например, в магнетроне. А как в промышленных условиях, например, сразу после аварии? Полагаю, что для намагничивания будет применяться импульсное поле. Импульсная установка – небольшая, размагниченный образец можно намагничивать по частям и использовать в любом месте. Кстати, привлекает идея использовать подобные магниты для синхротронного источника. Представьте – небольшая шайба, а поле в ней с десятков Тл. Такие магниты с захваченным потоком могут производить даже мелкие фирмочки.

За рубежом диборид магния входит в самые большие проекты, включая ИТЭР, ускорители. Преимущество – дешевизна при параметрах, подходя-

щих для многих целей. Для ИТЭРа он будет важен, когда дело упрется в стоимость при разработке коммерческих вариантов термоядерного реактора.

К случаю, хочу обратить внимание на тот факт, что даже с хорошими сверхпроводящими проводами дела не пойдут без надежной и недорогой криогеники – криокуллеров. О том, что криокуллеры перспективны мы уже говорим лет 15, а воз и ныне там.

Что бы вы хотели сказать в заключение?

Наш Институт имеет уникальные шансы создать технологию магнитного обжатия диборид магния. Установки, генерирующие большие магнитные поля, фактически остались только у нас в институте. Давайте поддержим эти уникальные технологии. Конечно, установки сильных магнитных полей – это не нанобъект, но это готовая установка для получения провода из нанопорошка и уникальный прибор для исследования электрических и магнитных свойств наноматериалов.

ВТСП УСТРОЙСТВА

Сверхпроводящие ограничители тока (СОТ). 1996 – 2006 гг.

Разработка СОТ на основе ВТСП материалов началась практически одновременно с появлением самих ВТСП материалов. Следует отметить давние достижения российских ученых в этой области: ещё в 1988 г. в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского был разработан и успешно испытан макет СОТ со сверхпроводящим экраном (рис. 1а) [1]. За прошедшие годы было предложено несколько различных схем СОТ, некоторые из них были реализованы в виде достаточно мощных демонстрационных образцов.

По принципу работы СОТ можно разделить на три группы: индуктивные, выпрямительные и резистивные.

Ограничение тока короткого замыкания в СОТ индуктивного типа достигается за счет резкого возрастания его импеданса, чего можно добиться различными методами: экранированием сердечника из электротехнической стали ВТСП экраном, изменением степени насыщения магнитопровода СОТ, гибридной схемой, когда экранирующая обмотка замкнута на сверхпроводящий элемент, шунтированием катушки индуктивности сверхпроводящим элементом и т.д. СОТ индуктивного типа были реализованы в виде макетных образцов сразу после разработки технологии изготовления массивных элементов из плавленной ВТСП керамики (конец 80-х - начало 90-х годов). В 1996 г. компания АВВ изготовила демонстрационный СОТ - 10 кВ; 1,2 МВА [2], затем его подвергли тщательным стендовым испытаниям и в течение года эксплуатировали в Женевской энергосистеме на подстанции “Kraftwerk am Löntsch” (рис. 1, б).

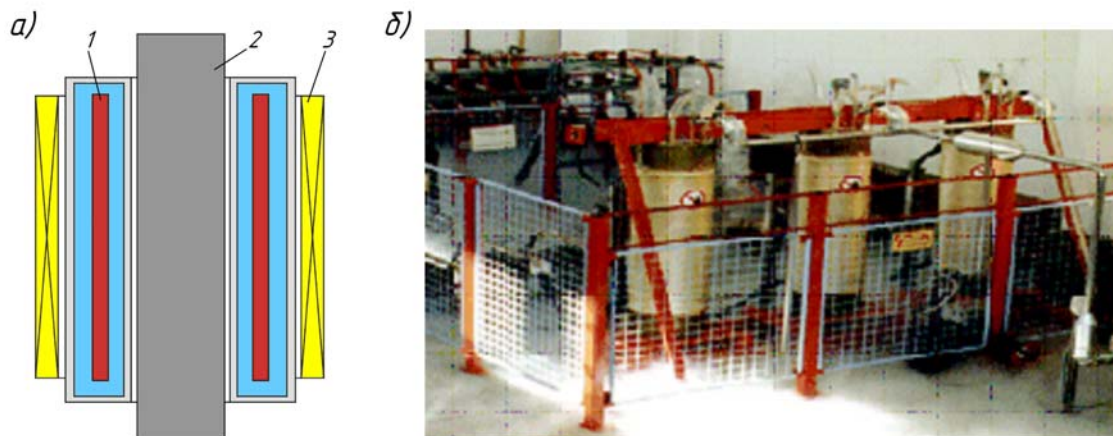


Рис. 1. COT со сверхпроводящим экраном: а) схема COT: 1 – сверхпроводящая обмотка; 2 – сердечник из электротехнической стали; 3 – сетевая обмотка; 1988 г. б) 1,2 МВА COT на подстанции “Kraftwerk am Löntsch”, 1996 г.

Однако в ходе работ над COT индуктивного типа выявили целый ряд принципиальных недостатков, в частности, недостаточное быстродействие, приводящее к слишком слабому ограничению (или отсутствию ограничения) ударного тока короткого замыкания (к.з.). Кроме того, создание COT с ВТСП экраном мощностью более 5 МВА сильно затруднено по причинам технологического характера. Несмотря на указанные недостатки, COT индуктивного типа могут найти свою нишу, и соответствующие разработки продолжают в ряде стран, например, в Израиле, однако, пока даже нет опытных образцов, способных работать в сети.

С появлением в конце 90-х годов ВТСП проводов 1-го поколения стало возможным изготовление ВТСП катушек индуктивности, что сделало возможным создание COT выпрямительного типа. Такой COT представляет собой диодный мост, в диагональ которого включена сверхпроводящая катушка индуктивности, поэтому скорость нарастания тока в защищаемой цепи ограничена ее индуктивностью, за счет чего достигается полное ограничение ударного тока к.з. Это скорее не столько «токоограничитель», сколько «замедлитель» скорости нарастания тока. Он просто заметно облегчает последующее и ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ срабатывание обычных размыкателей (см. ниже о проблеме с COT компании IGC). Следует отметить, что первое упоминание COT выпрямительного типа в литературе относится к концу 60-х годов прошлого века, однако из-за проблем

с криогенным обеспечением и сверхпроводниковой технологией, исследования тогда ограничились лишь малыми лабораторными образцами.

В настоящее время работы по созданию COT выпрямительного типа активно ведутся в США и Японии. В 1999 г. в США содружеством компаний General Atomics и Intermagnetic General Corp. совместно с Los Alamos Natl. Lab. был разработан, изготовлен и испытан в энергосистеме Южной Калифорнии демонстрационный образец трехфазного 20 МВА COT (рис. 2) [3]. Длительность короткого замыкания при использовании COT выпрямительного типа строго лимитирована, в случае отказа выключателя, стоящего после COT, происходит либо перегорание ВТСП, либо разрушение преобразовательного агрегата – что и произошло в 2001 г. с описанным выше токоограничителем. В 2005 г. в Японии прошли предварительные испытания однофазного высоковольтного (66 кВ) 10 МВА COT [4]. Испытания проводили при пониженном до 20 кВ напряжении, было достигнуто хорошее ограничение тока к.з при полном подавлении ударного тока, работы над этим COT продолжают.

В Китае с августа 2005 г. испытывается на действующей подстанции COT выпрямительного типа, снабженный устройством на основе IGBT вентиляей, включающим в цепь (в момент к.з.) дополнительное активное сопротивление.

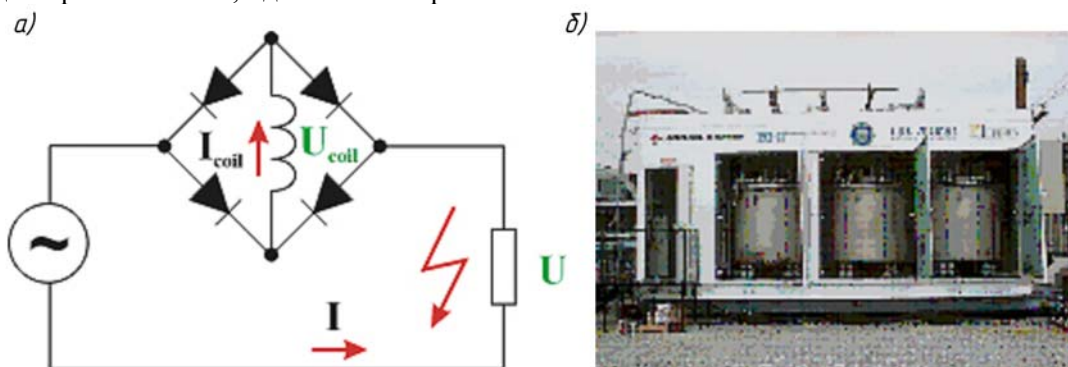


Рис. 2. COT выпрямительного типа: а) принципиальная схема COT; б) 20 МВА COT в энергосистеме южной Калифорнии, 2000 г.

Следует обратить внимание на крайне высокую стоимость СОР выпрямительного типа и специфичную сферу их применения в будущем: данные СОР не являются самостоятельными устройствами, их следует рассматривать как составные узлы преобразовательных агрегатов для вставок постоянного тока или линий электропередачи FACTS, а сверхпроводящие катушки в них являются своего рода индуктивными накопителями энергии. Высокая активность в США и Японии по созданию СОР этого типа связана с национальной спецификой энергосистем: в США для увеличения пропускной способности линий электропередачи активно внедряется технология FACTS, а энергосистема Японии представляет собой настоящий «зоопарк», где сети с частотой 50 Гц соединяются вставками постоянного тока с 60 Гц сетями.

Развитие ВТСП технологии, приведшее к существенному улучшению свойств ВТСП керамики Bi-2212, и появление ВТСП проводов 2-го поколения, а также ВТСП пленок на основе иттрия (YBCO) позволило к настоящему времени реализовать такую простую с точки зрения электротехники, но такую сложную с точки зрения ВТСП технологии резистивную схему СОР. Как ясно из названия, ограничение тока короткого замыкания происходит за счет резкого возрастания активного сопротивления СОР. В отличие от остальных схем СОР, резистивные СОР могут работать и в сетях постоянного тока.

Создание СОР резистивного типа связано с решением целого ряда инженерных и технологических задач: необходимо добиться синхронного перехода сверхпроводящих элементов СОР в нормальное состояние за времена меньше 5 мс и равномерного нагрева сверхпроводящего элемента, а время остывания сверхпроводящих элементов должно быть меньше чем время автоматического повторного включения (АПВ). Потери в ВТСП элементах на переменном токе должны быть минимизированы для удешевления криогенного обеспечения. На сегодняшний день пути решения описанных выше проблем проработаны в достаточной мере, чтобы можно было приступить к созданию реальных полупромышленных СОР, а не демонстрационных образцов, пусть и высокой мощности.

К началу 2006 г. в Германии, Японии и США были завершены работы по созданию реальных прототипов коммерческих СОР для сетей 6-10 кВ. Одним из наиболее успешно реализованных проектов СОР на напряжение 10 кВ является трехфазный полупромышленный СОР CURL-10 мощностью 10 МВА созданный в Германии [5,6]. СОР состоит из 90 токоограничивающих элементов на основе плавной ВТСП керамики Bi2212 (рис. 3). Годичные испытания CURL-10 в 2004 г. в энергосистеме показали его высокую надежность, глубокое ограничение токов короткого замыкания и хорошее быстродействие в 3-5 мс. CURL-10 стал первым в мире СОР,

который можно считать реальным прототипом будущих коммерческих устройств. Однако следует отметить высокую стоимость этого СОР: цена одного (из 90 элементов) составляет 3000-5000 евро.

С 2003 г. в США компания Nexans ведет работы по созданию матричного токоограничителя (MFCL), состоящего из большого числа сверхпроводящих токоограничивающих элементов, шунтированных индуктивностями [8]. Конечной целью проекта является создание СОР для сетей 110-220 кВ. Компания Siemens в 2005 г. создала и успешно испытала модельный трехфазный 1 МВА, 10 кВ СОР на основе иттриевых ВТСП пленок (YBCO), быстродействие СОР составило менее 2 мс, что позволило почти полностью ограничить ударный ток. Аналогичный проект был реализован в Ю.Корее [7]. В Японии фирма Toshiba ведёт разработку токоограничивающих элементов для СОР с током до 5 кА.

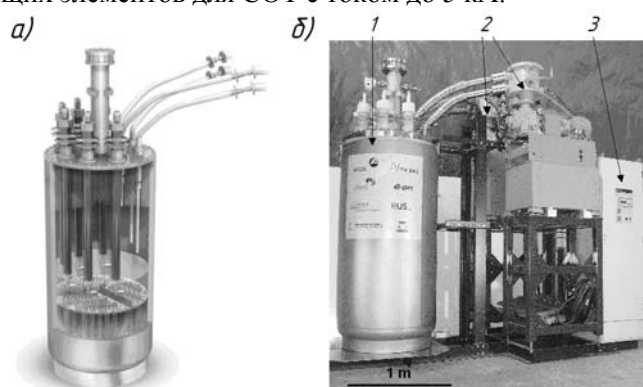


Рис. 3. СОР CURL – 10: а) 3D вид CURL-10; б) CURL-10 в сборе (испытания 2004 г.):

1 – СОР; 2 – система охлаждения; 3 – шкаф с управляющей автоматикой.

После появления в 2006 г. коммерческих ВТСП проводов 2-го поколения и проводов на основе MgB₂ (диборида магния) можно ожидать их широкого использования для изготовления токоограничивающих элементов СОР. Токонесущая способность проводов на основе MgB₂ выше, чем у всех ныне существующих ВТСП материалов, а их ожидаемая цена составляет 5 долл./кА·м (при рабочей температуре 25 К). Работы по созданию резистивного токоограничителя на основе MgB₂ (6,6 кВ, 400А) ведутся в Англии компанией Rolls Royce.

Крупных проектов СОР на основе ВТСП проводов 2-го поколения пока не заявлено, но практически все разработчики СОР в мире проводят исследования малых макетных СОР на их основе. Следует отметить работы компании Siemens (на основе ленты 344S производства American Superconductor) и деятельность по сравнению свойств сверхпроводящих элементов, изготовленных из 2212 керамики, с элементами на основе ВТСП проводов 2-го поколения, осуществляемую командой разработчиков MFCL (компания Nexans). Первые публикации по данной тематике следует ожидать в ближайшие месяцы.

Для охлаждения СОР до рабочей температуры (66–77 К) обычно используют микрофрижераторы (криокулеры) производства Stirling Cryogenics, CryoMech, SHI Cryogenics (Sumitomo). В течение ближайших нескольких лет прогнозируют сильное снижение цен на микрофрижераторы на фоне улучшения их технических характеристик, что обуславливается развитием целевых национальных программ в США и Германии, а также появлением на рынке новых крупных производителей (Siemens). Ставший классическим для криокулеров цикл Гиффорда-Макмагона постепенно вытесняется более экономичным циклом Стирлинга, а использование пульсационных труб (Q-drive) в холодных головках позволит существенно повысить их надежность за счет отказа от движущихся частей.

По оценке компании Siemens, сделанной на основе анализа существующих прототипов СОР, а также прогноза цен на криогенное оборудование и ВТСП материалы, стоимость СОР в случае их массового производства составит 5000 долл. (140 тыс. руб.) в расчете на 1 МВА проходной мощности.

По мнению многих экспертов, СОР является *наиболее востребованным* сверхпроводящим устройством для электроэнергетики. Видимо поэтому, число работ по СОР, представленных на конференциях (например, на недавней ASC-2006), заметно больше числа работ по другим электротехническим устройствам.

В.Щербаков

1. *IEEE Trans. Magn.* **27**, 1089, (1991)
2. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 1059, (1995)
3. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **10**, 832, (2000)
4. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **16**, 683, (2006)
5. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 1961, (2005)
6. *Supercond. Sci. & Techn.* **17**, 122, (2004)
7. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 2027, (2005)
8. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 1982 (2005)

ВЫСТАВКИ

Выставка «Криоген-Экспо»

http://www.mirexpo.ru/exhibitions/cryogen06_full.shtml
14-17 ноября с.г. в выставочном центре «Москва» состоялась очередная, Пятая международная специализированная выставка «Криоген-Экспо».

Официальный пресс-релиз по итогам выставки приводится ниже.

Ваш корреспондент посетил и внимательно осмотрел выставку. Впечатления следующие.

1. Криогенная промышленность в России и даже в части СНГ, несмотря на трудности «пере-

ходного периода», все-таки жива и даже кое в чем процветает.

2. Однако основная направленность (по моему впечатлению 98-99%) большинства, вполне достойных разработок сводится к производству, доставке и использованию жидкого и газообразного кислорода для металлургической промышленности. Что, в общем-то, понятно, ибо с турбодетандера для кислорода, изобретенного П.Л. Капицей, и началась тогда еще советская криогенная промышленность. И сейчас все разработки направлены в область производства металлов (весьма практическую).

3. В областях разделения воздуха, получения жидкого кислорода/азота и их доставки – есть все, что можно себе представить (особенно, поскольку на российском рынке присутствуют такие «киты» как AirLiquid и Linde, с которыми более менее успешно конкурирует российский «Криогенмаш»).

4. Впечатляет диапазон транспортных сосудов для доставки жидкого кислорода (и конечно азота) – от небольших 5-ти литровых сосудов до огромных железнодорожных цистерн. Есть предложения и гелиевых сосудов, правда в основном зарубежных и дорогих.

5. Чего-то специфического, направленного на сверхпроводимость, замечено не было. Для таких китов, как Криогенмаш, наши проблемы – это пока мелочь. Впрочем, где жидкий кислород, там и азот, так что проблем с азотом для ВТСП электроэнергетики не будет. Выбор возможных поставщиков криогенного оборудования (как представленных на выставке так и не представленных там, например, Гелиймаша) достаточно обширен, что радует. Много так же и дистрибьюторов зарубежного оборудования. Цены, увы, мировые или близкие к ним.

6. Единственная компания, близкая к сверхпроводимости и гелиевым изделиям – это «РТИ, Криомагнитные системы» (www.cryo.ru), хорошо известная нашему сообществу.

7. Было представлено заметное количество приятных мелочей. Например, симпатичные форвакуумные насосы, изготавливаемые по иностранным лицензиям и за разумные цены, современные гелиевые течеискатели, всяческая низкотемпературная арматура и т.п.

8. Организация выставки много ниже средней. Выставка по сути своей невелика, всего 42 стенда, ютилась в огромном зале бывшего павильона «Космос» и весьма в нем терялась. Конференции не были качественно организованы, да и проводились в разных местах, слабо привязанных к выставке.

9. Тем не менее, впечатление положительное, удалось узнать много интересного и нового. Следующую выставку рекомендую обязательно посетить.

С пресс-релизом по итогам выставки можно ознакомиться на сайте <http://www.mirexpo.ru/>

В.Высоцкий

ФИНАНСИРОВАНИЕ И РЫНОК

Темп и финансирование разработок 2G провода в США

Достигнутые цели разработок	Этапы разработок, годы	Оценка стоимости каждого этапа, млн. долл.		
		Коммерческий сектор	Госбюджет	Общая стоимость
Непрерывный процесс изготовления ленты длиной 1 м	1999-2003	8,0	8,0	16,0
Лабораторная технология провода длиной 100 м	Середина 2002 - 2004	15,0	15,0	30,0
Полевые испытания провода длиной 100 м	Последний квартал 2004 - 2006	20,0	20,0	40,0
Поставленная цель	2007-2008	Je= 15000А/см², 65 К, 3 Т		

Physica C 445-448, 488 (2006)

Издатель РИЦ «Курчатовский институт»

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

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

научный руководитель ИСФТТ РИЦ «Курчатовский институт»

Редакторы *В.С. Высоцкий* vsotsky@gmail.com, *С.С. Иванов* ssi@iht.mpei.ac.ru

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

Верстка *И. Фурлетова*

Ответственный за тираж *Н. Морозова*