Информационный бюллетень
СВЕРХПРОВОДНИКИ для электроэнергетики
Исследовательские центры Фирмы Инвесторы
Провода Кабели Генераторы Накопители
Трансформаторы Токоограничители
Том 12 выпуск 2 (53)
апрель 2015
http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/

Новости сайта «Сверхпроводники в электроэнергетике» http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/

Сверхпроводниковый ограничитель тока (СОТ) в Германии

К концу этого года Siemens планирует установить прототип СОТ в городскую сеть Аугсбурга (Бавария). В процессе испытаний СОТ будет введен в сеть города, временно запитанную от ТЭЦ предприятия «MTU onsite energy» с максимальной мощностью 15 МВт. В течение года Siemens будет проводить испытания, затем, согласно пожеланиям MTU и сетевой компании г. Аугсбурга, СОТ останется в распределительной сети города. Проект выполнен при поддержке Министерства экономики Баварии. Любопытно, что замена токоограничивающих реакторов, традиционно используемых в сети при ограничении токов короткого замыкания, позволит в мировых масштабах сэкономить до 1100 МВт, которая съедается в более чем 44000 токоограничивающих. реакторах. На фото изображен процесс изготовления одной из секции СОТ.

site Siemens

Новая сверхпроводниковая магнитная система на 19 Тл

Английской компанией Oxford Instruments разработана и смонтирована в дрезденской лаборатории сильных магнитных полей (Hochfeld-Magnetlabor Dresden - HLD) компактная магнитная система с индукцией 19 Тл в рабочем отверстии диаметром 150 мм. Магнитная система работает при температуре 4,2 К. Рекордные характеристики (ранее для получения таких магнитных полей требовалась более низкая температура - 2,2 К) были достигнуты благодаря инновационным конструктивным решениям ниобий-оловянных обмоток, способных выдерживать высокие механические напряжения. Запасенная в магнитной системе энергия составляет 5,7 МДж. Ниобий-оловянный проводник был изготовлен в компании Oxford Superconducting Technology (США) по технологии с внутренним источником подпитки. Магнитная система

И далее…

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Современное состояние технологии производства длинномерных ВТСП-2 лент (Краткий обзор по материалам конференции Coated Conductors for Application-2014) **2**

ЗАРУБЕЖНЫЕ ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

Производство ВТСП-2 проводников в компании Fujikura **7**

ДИБОРИД МАГНИЯ MgB_2

Прогресс в технологии производства MgB_2 проводников и устройств на их основе **9**

будет востребована при исследовании поведения нано- и био- объектов в сильных магнитных полях с целью поиска путей создания новых перспективных материалов.

site Nanotechnology Now

В ультратонких пленках на основе железа достигнута критическая температура выше 100 К.

Исследование монослоя халькогенида железа FeSe на легированной ниобием монокристаллической подложке $SrTiO_3$, проведенное коллективом китайских ученых, убедительно доказало наличие сверхпроводящего состояния при 109 К. На основе измеренных при 3 К четырехконтактным методом вольт-амперных характеристик оценены величины критической плотности тока - $1{,}3 \times 10^7$ А/см2 и критического поля - 112 Тл. Впечатляет почти 20-ти кратная разница критических температур у монослоя и массивного материала (5,5 К). Механизм возникновения высокотемпературной сверхпроводимости в столь тонких слоях пока не ясен, однако не исключено, что основную роль при переходе от массива к тонким пленкам играет усиление электрон-фононного взаимодействия на границе раздела пленка/подложка. Эти исследования возможно станут стимулом к поиску новых ВТСП материалов на основе искусственных тонкопленочных структур.

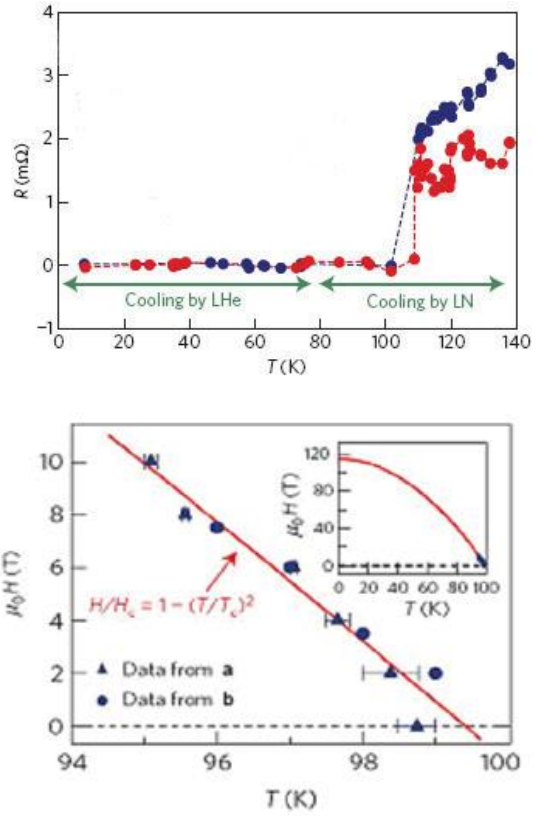

Рис. а) Температурная зависимость сопротивления пленок FeSe в поперечных магнитных полях и б) зависимость поперечного критического поля от температуры

Nature Materials, 2015, v.14, N 3, p.285

А.К.Чернышева

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Современное состояние технологии производства длинномерных ВТСП-2 лент (Краткий обзор по материалам конференции Coated Conductors for Application-2014)

В последнее время наметился стабильный рост производства длинномерных высокотемпературных лент 2-го поколения (ВТСП-2). Это произошло как благодаря бурному развитию технологии производства, так и из-за роста спроса на ВТСП проводник. На сегодняшний день, по крайней мере, шесть компаний в мире производят длинномерные ВТСП-2 ленты. Также ведутся масштабные работы по созданию и внедрению электротехнического оборудования на основе длинномерных ВТСП-2 лент, такого как кабели, ограничители тока короткого замыкания, трансформаторы, моторы и генераторы.

Как было заявлено на прошедшей в ноябре-декабре конференции CCA-2014, средняя длина одного отрезка ВТСП проводника уже превышает 500 м. Американские компании American Superconductors и SuperPower , корейская компания Sunam вышли на уровень производства в 200 км в год. Японская корпорация Fujikura, российско-японская компания SuperOx и немецкая корпорация Bruker (BHTS) способны производить более 10 км ВТСП проводника в год каждая. Ожидается, что в этом году к ним присоединятся две немецкие компании - Theva и Deutche Nanoschicht, а также американская компания Superconductor Technologies Inc. (STI), которые сейчас активно заняты наладкой оборудования и отработкой технологии. На стадии исследований и разработки технологии находятся еще семь компаний, из них три китайских, одна японская, одна американская, одна испанская, а также опытная пилотная линия в НИЦ «Курчатовский институт», которая станет базой для создания первого в России независимого производства длинномерных ВТСП-2 лент. Сводная таблица по отмеченным выше компаниям, представлена на Рис. 1.

ВТСП-2 ленты представляют собой весьма наукоемкие материалы, технологии их производства многообразны и могут основываться как на химических, так и на физических методах производства. По этим причинам в данном обзоре рассмотрены основные технологии производства, используемые ведущими производителями, тем более, что технология определяет как качество, так и количество годной продукции, а также и ее стоимость.

В качестве материала для подложки, практически все компании используют либо Хастеллой (С-276), либо полированную нержавеющую ленту с шероховатостью Ra=2-5 нм. Это обусловлено тем, что данные материалы немагнитные. Только одна компания (AMSC) продолжает выпуск длинномерных ВТСП-2 лент на RABiTS подложках (см. рис. 1) из

магнитного материала и, по всей видимости, это связано с хорошим освоением производства.

Как видно из рис. 1 подложки с буферными текстурированными слоями для длинномерных ВТСП-2 лент, в основном, изготавливаются методом IBAD (осаждение с использованием вспомогательного ионного пучка). В качестве буферного текстурированного слоя обычно используется оксид магния MgO, который позволяет устранить взаимодействие ВТСП YBCO покрытия с подложкой. Использование буферного текстурированного покрытия обусловлено, прежде всего, возможностью достижения необходимых параметров биаксиальной текстуры за в 50-200 раз меньшие времена, чем для других кубических оксидов (рис. 2).

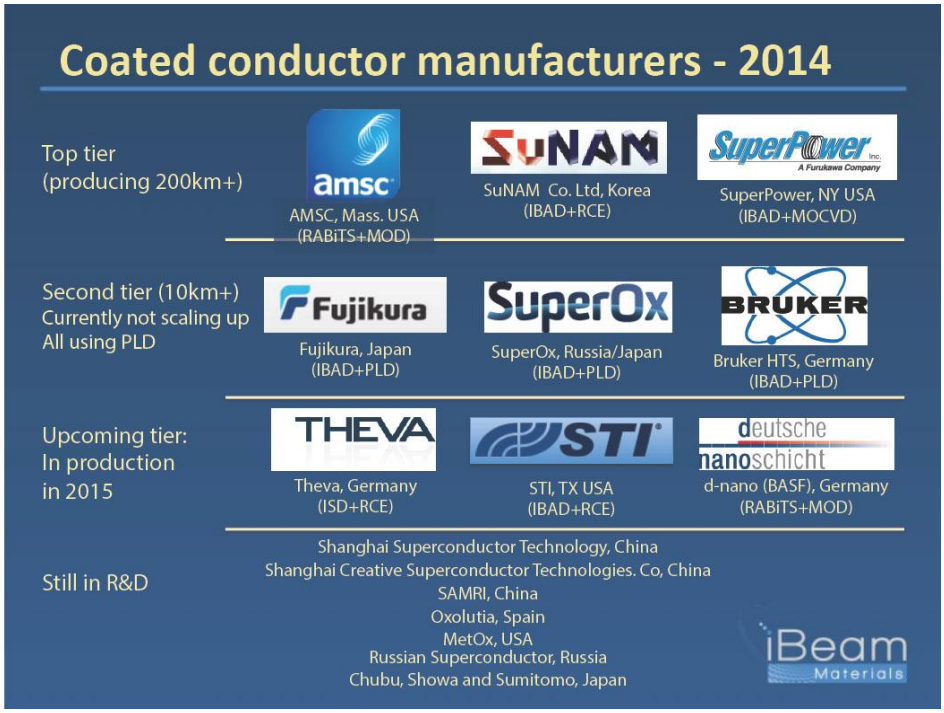

Рис. 1. Производители длинномерных ВТСП-2 лент

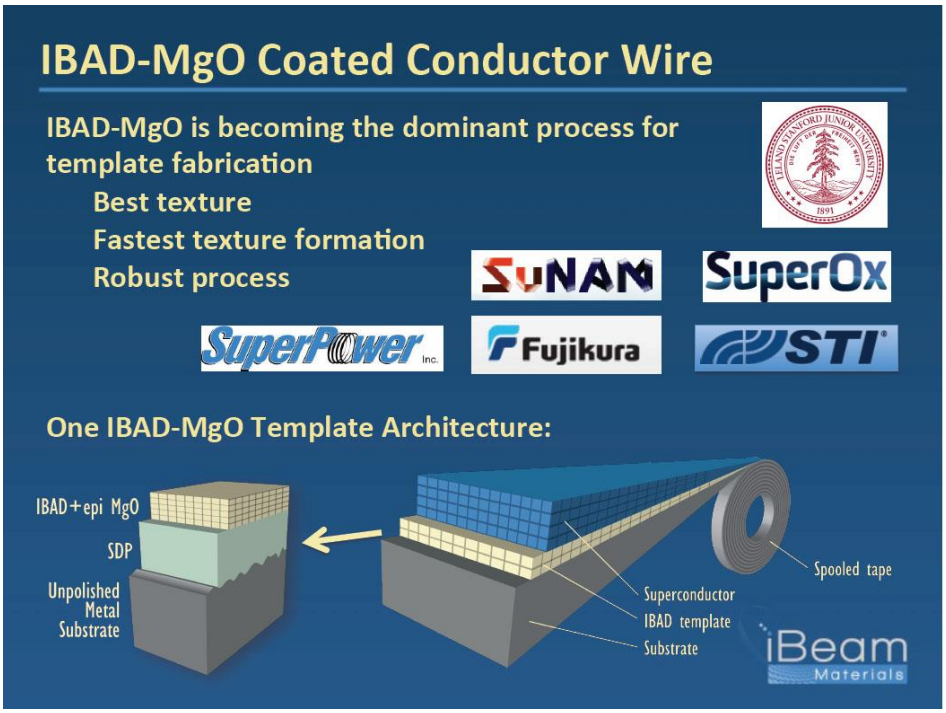

Рис. 2. Сводная информация по производителям длинномерных ВТСП-2 лент в мире использующих в своей технологии IBAD метод нанесения буферных покрытий.

На сегодняшний день существуют, по крайней мере, два основных метода получения высоко текстурированного сверхпроводящего покрытия на основе ReBCO: химический и физический. К химическим

методам относятся метод разложения металлоорганических соединений (MOD), используемый компанией AMSC, метод осаждения из паровой фазы металлорганических соединений (MOCVD) - SuperPower, а также метод реактивного со-испарения с последующим осаждением и химической реакцией (RCE-DR) - SUNAM. Более подробно о RCE-DR методе было описано в выпуске 4. т.11.

Метод RCE-DR является двухстадийным процессом, который состоит из быстрого со-испарения мишеней при низкой температуре и низком парциальном давлении кислорода, с последующим отжигом при высокой температуре и высоком парциальном давлении кислорода (см. рис. 3).

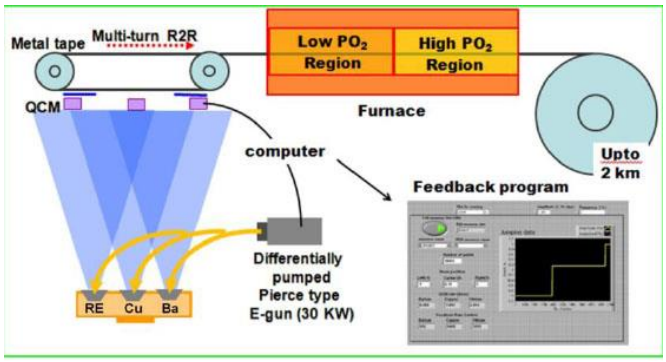

Рис. 3. Схема RCE-DR процесса

Алгоритм обратной связи позволяет сохранять состав напыляемого сверхпроводника в нужной стехиометрии, при этом скорость осаждения каждого материала контролируется при помощи кварцевых измерителей толщины для регулировки мощностей электронных пучков. В процессе RCE-DR ленты, на которых сначала формируется аморфный слой предшественника при низкой температуре под низким давлением кислорода при помощи электронного пучка, непрерывно проходят через высокотемпературную печь, имеющую две зоны с различным парциальным давлением кислорода для создания сверхпроводящей фазы. Основными достоинствами этого метода являются высокая скорость со-испарения при низких температуре и парциальном давлении, а также быстрое преобразование (<<30 с) аморфной стеклообразной фазы в сверхпроводящую фазу при высокой температуре и высоком парциальном давлении кислорода. Стоит также отметить, что скорость производства ВТСП-2 ленты шириной 4 мм при использовании этого метода составляет порядка 360 м/ч. В результате этот метод отличается низкой себестоимостью. Именно по этим причинам компания SUNAM является одним из лидеров в производстве длинномерных ВТСП-2 лент (Ic=800 А/см ширины 12 мм ленты), что подтверждается измерениями критического тока (см. рис. 4).

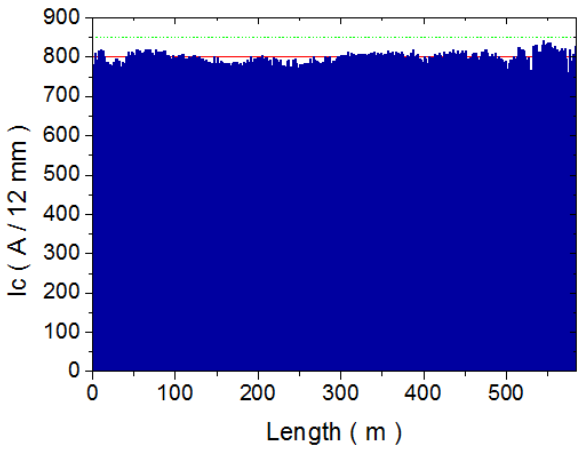

Рис. 4. Распределение критического тока длинномерной ВТСП-2 лент шириной 12 мм производства компании Sunam

На Рис. 5 представлены зависимости критической инженерной плотности тока различных ВТСП-2 лент от внешнего магнитного поля при температуре 40 К. Следует отметить, что более заметный спад критической плотности тока в сильных магнитных полях наблюдается для ВТСП-2 лент производства компаниями Sunam и AMSC, тогда как проводники производства SuperPower, Fujikura и Bruker значительно лучше ведут себя при работе в магнитных полях.

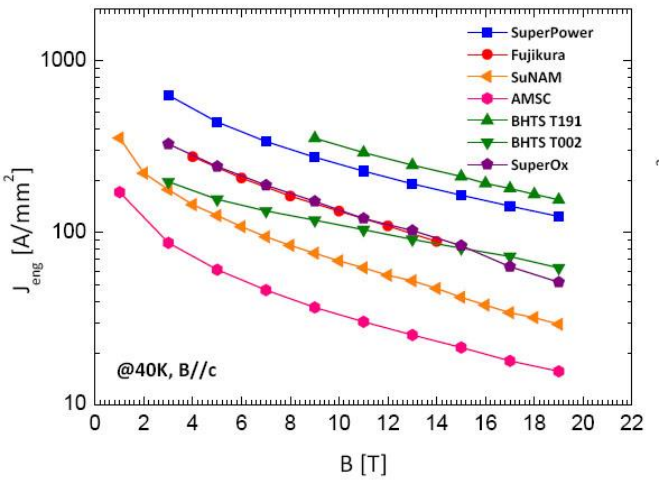

Рис. 5. Зависимость критической плотности тока ВТСП-2 лент ведущих мировых производителей при температуре 40 К в полях до 20 Тл.

К основному физическому методу напыления ВТСП слоя относится метод импульсного лазерного осаждения (PLD). Этот метод является хорошо изученным и относительно простым. Концепция метода заключается в том, что импульсный лазерный пучок приводит к быстрому испарению вещества с поверхности мишени и образованию обладающего высокой энергией плазменного факела, из которого вещество осаждается на поверхность. Длина волны, длительность импульса и энергия одиночного импульса являются определяющими параметрами процесса. Ха-

рактерное значение энергии лазера на поверхности мишени составляет 1-3 Дж/см^2, а характерный нижний предел длины волны лазера имеет значение порядка 200 нм. Было представлено достаточно большое количество докладов по получению длинномерных ВТСП-2 лент этим методом. Ярким подтверждением этого являются, например, доложенные результаты по влиянию внешнего магнитного поля на критические свойства (см. рис. 5 и 6).

На рис. 7 представлены архитектуры длинномерных ВТСП-2 лент ведущих мировых производителей в промышленном масштабе. Это компании AMSC, Sunam, SuperPower, Fujikura, SuperOx и Bruker.

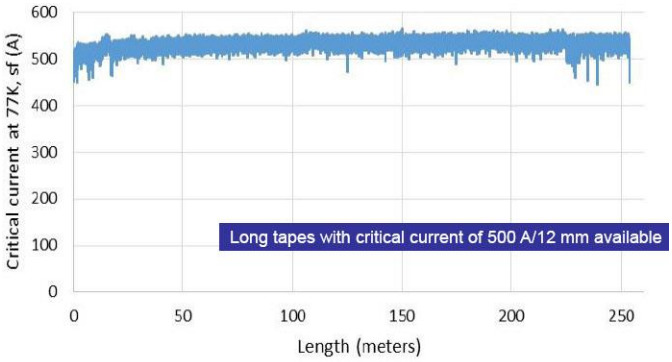

Рис. 6. Распределение критического тока по длине длинномерной ВТСП-2 ленты производства компании SuperOx

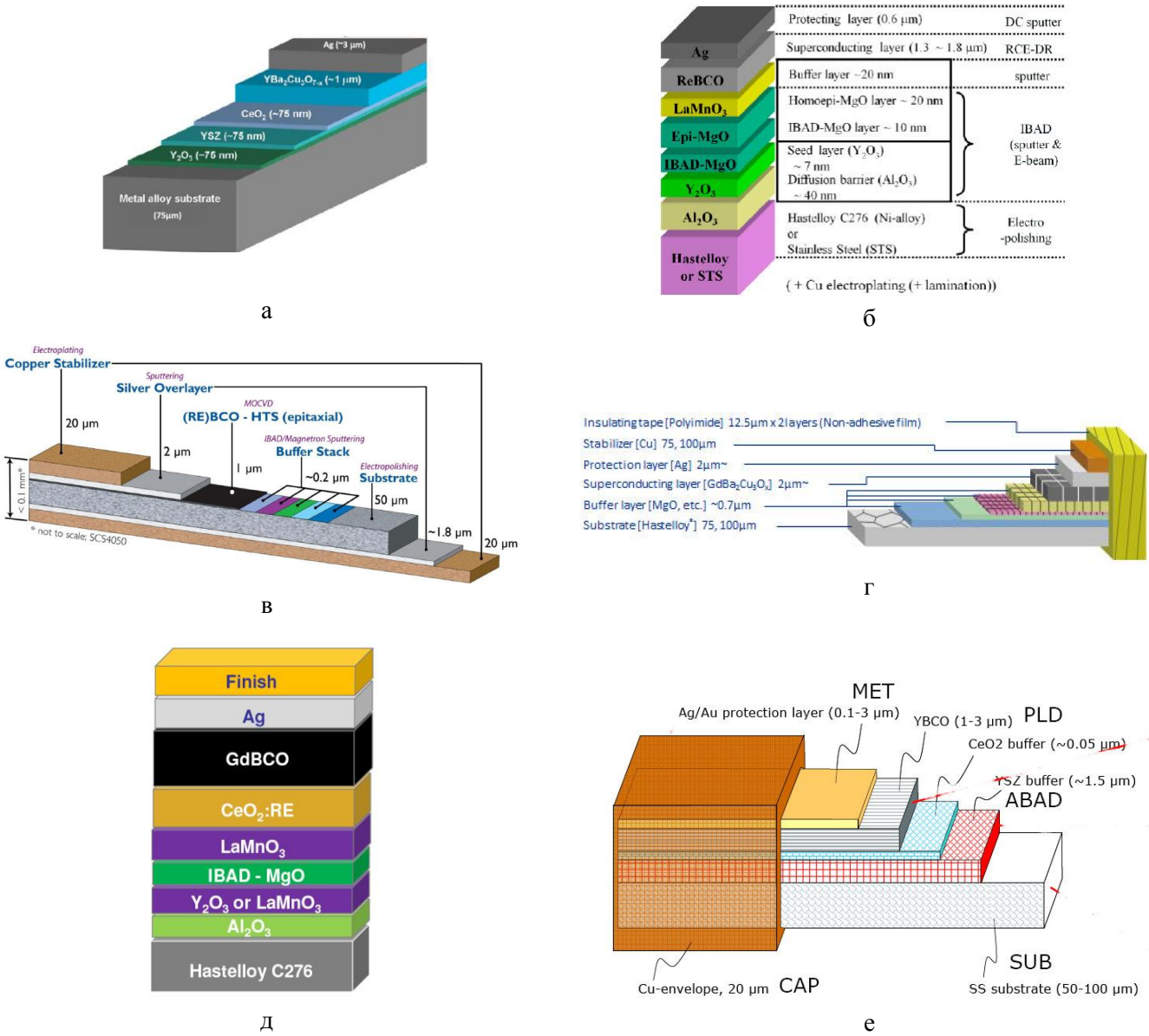

Рис. 7. Схематические изображения структуры длинномерных ВТСП-2 лент ведущих мировых производителей. а) - American Superconductors, б) - Sunam, в) - SuperPower, г) - Fujikura, д) - SuperOx, е) - Bruker

На сегодняшний день существенной преградой для развития рынка ВТСП-2 лент второго поколения является как стоимость исходных материалов, так и стоимость технологического процесса. Доминирующими факторами по стоимости исходных материалов, кроме серебра является стоимость материала мишеней для сверхпроводящего покрытия, а также стоимость подложки, их снижение позволит снизить стоимость конечного продукта (рис. 8).

покрытия. На Рис. 10 представлена оценка стоимости 1 кА/м для обоих типов процессов с различным процентом выхода годного, а также количество ВТСП-2 ленты, которое необходимо выпускать в течение года для снижения стоимости проводника.

Согласно анализу компании Theva, для реализации плана компании iBeam, необходимо изменить толщину ВТСП покрытия с 3 мкм до 4,5 мкм (уменьшение затрат на 12%), повысить плотность критического тока с 1,5 МА/см^2 до 2 МА/см^2 (уменьшение затрат на 14%), а также провести ряд других действий, и в итоге, снизить затраты на 80% (Рис. 11). Это приведет к тому, что в течение 3 лет необходимо будет увеличить выпуск ВТСП-2 лент вдвое, что является достаточно амбициозным планом, а снижение цены ВТСП провода до уровня 5$/кАм - весьма оптимистичным (Рис. 12). В настоящее время для реализации планов, предложенных компанией iBeam, необходимо создание стабильно растущего рынка сверхпроводящей продукции, который на сегодняшний день практически отсутствует во всем мире.

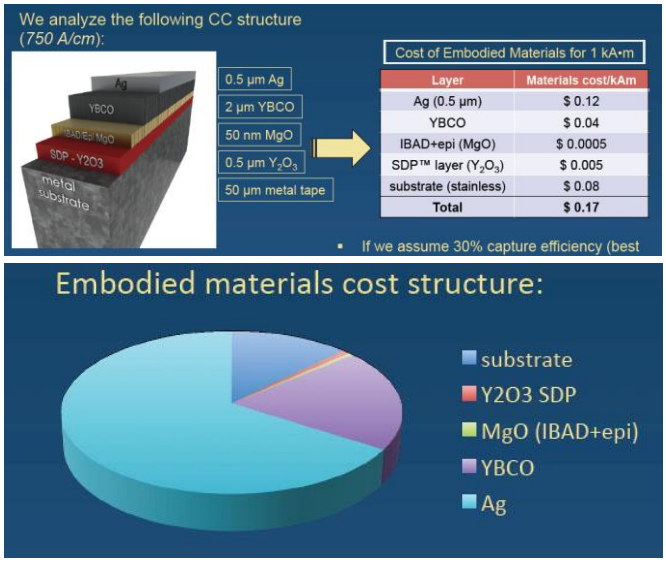

Рис. 8 Оценка стоимости исходных материалов.

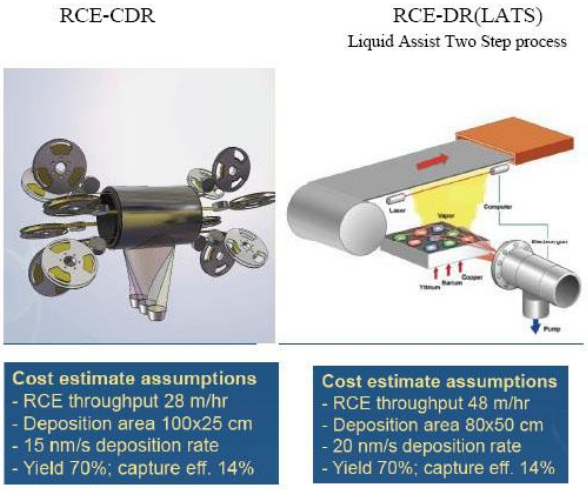

Рис. 9. Сравнение технологий RCE-CDR и RCE-DR

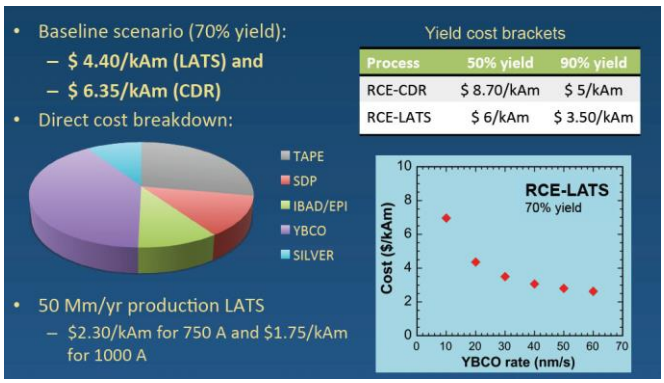

Рис. 10 Экономическая оценка преимущества технологии RCE-DR по сравнению с RCE-CDR

На конференции CCA-2014 компанией iBeam на основе сравнения двух методов – RCE-CDR и RCE-DR(LATS) был проведен анализ данных по удешевлению готовой продукции за счет увеличения объемов выпуска до 5000 км/год. Как видно из представленного на Рис. 9 сравнения методов наиболее подходящим процессом, по мнению компании iBeam, является процесс RCE-DR. Этот процесс характеризуется более высокой производительностью за счет повышенной скорости напыления YBCO

Driver	Necessary improvement	Material cost	Labor cost	Capex	Savings potential COGS
Capacity utilization	1 shift → 3 shifts	○	◕	●	-26%
Yield	+10%	●	●	●	-7%
HTS thickness	3µm → 4,5 µm	◕	◕	◕	-12%
Performance	1,5 MA/cm²→ 2 MA/cm²	●	●	●	-14%
Process automation	- 10 FTE per line	○	●	◑	-7%
Procurement success	HTS granulate: -70%	●	○	○	-14%
Total					-80%

Рис. 11. План удешевления стоимости выпускаемых ВТСП-2 лент

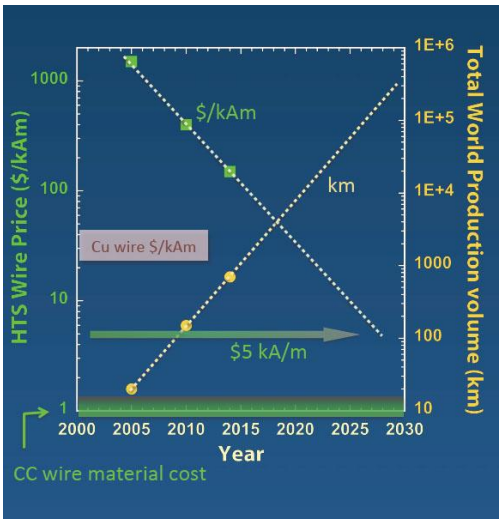

Рис. 12. Прогноз уменьшения стоимости конечной продукции в сопоставлении с уровнем мирового объема производства ВТСП-2 лент в год (iBeam)

Таким образом, по данным докладов конференции, в лидерах рынках находятся компании, производство которых основано на химических методах осаждения. Это компании Sunam, American Super-

conductor и SuperPower. Химический метод осаждения остается пока наиболее производительным, дешевым и доступным по сравнению с физическими методами осаждения. Однако стоимость продукции по-прежнему не позволяет провести широкое внедрение продукции ВТСП-2.

Материалы подготовлены на основе презентаций, представленных на конференции Coated Conductors for Application, проходившей в ноября-декабре 2014 года в Корее.

П.Н. Дегтяренко

ЗАРУБЕЖНЫЕ ФИРМЫ И ИХ РАЗРАБОТКИ

Производство ВТСП-2 проводников в компании Fujikura

Компания Fujikura входит в число наиболее успешных производителей ВТСП лент второго поколения (ВТСП-2). Выпускаемая компанией ВТСП-2 лента (см. Рис. 1) состоит из хастеллоевой подложки, на которую методом реактивного напыления нанесены слои оксида Y_2O_3 (20 нм) и Al_2O_3 (150 нм), слой MgO осаждается с помощью ионной технологии (IBAD - Ion Beam Assisted Deposition). Буферный слой CeO_2 и сверхпроводящий слой GdBCO наносятся с помощью импульсного лазерного осаждения (PLD). Затем магнетронным напылением наносится защитный слой серебра (до 6-13 мкм) и припаивается стабилизирующий слой медной фольги (75-100 мкм). Затем, проводник со всех сторон покрывается полиамидной изолирующей пленкой. Общая толщина ВТСП ленты составляет 150-300 мкм при ширине от 5 до 12 мм со среднем значением критического тока при 77 К в собственном магнитном поле более чем 500 А/см (максимальное достигнутое значение - 937 А/см).

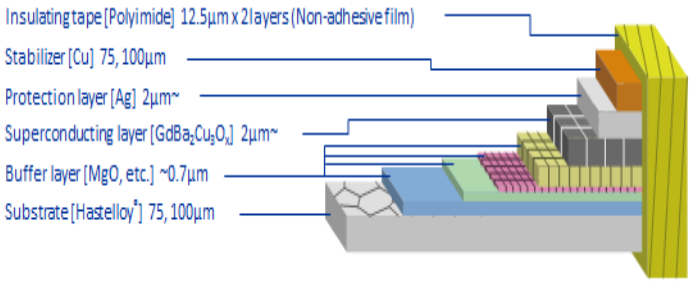

Рис. 1. Архитектура ВТСП-2 ленты компании Fujikura.

Столь высокие характеристики ВТСП-2 проводников стали возможны благодаря усовершенствованиям технологии PLD напыления, таким как Multi-Plume и Hot-Wall heating (см. рис. 2). Благодаря технологии Hot-Wall, удалось увеличить толщину сверхпроводящего слоя и повысить критический ток, а с помощью Multi-Plume процесса значительно увеличилась производительность производства.

Начиная с 1991 года, коллектив ученых под руководством Иидзимы работает над усовершенствованием технологии IBAD [1]. Впервые в мировой практике был применен метод напыления с применением вспомогательного (ассистирующего) ионного пучка падающего под углом отличным от нормального, что позволило сформировать биаксиальную текстуру в пленках YSZ на полированных поликристаллических подложках из никелевого сплава (Hastelloy C-276). На данный момент в установке IBAD напыления используется ионный источник размером 110×15 см, что позволило поднять производительность технологического процесса с 150 м/ч до 1000 м/ч.

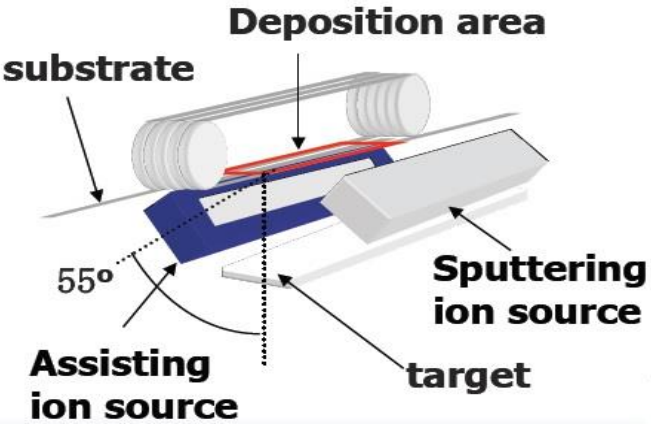

Рис. 2. Схема IBAD процесса Fujikura.

Отдельного внимания заслуживает модификация процесса импульсного лазерного нанесения сверхпроводящего слоя, носящая название hot-wall (или «горячая стена», см. Рис. 3). Хотя детали данной технологии являются коммерческой тайной, общей смысл сводится к организации однородного температурного поля в камере импульсного лазерного осаждения при помощи инфракрасных нагревателей. Конечно, температура подложки контролируется и при реализации PLD метода другими фирмами (например, Bruker), но нагреватели, как правило, располагаются в барабане - нагрев ленты происходит со стороны подложки, а не со стороны YBCO слоя. По-видимому, это дает худшие результаты чем «горячая стена», в публикациях японских исследователей такая технология называется «холодной стеной». Поскольку основным источником температурной неоднородности ленты является плазменный факел, периодически изменяющий температуру подставленных под него участков, выравнивание температуры необходимо производить с наружной стороны. Передача тепла со стороны подложки осложняется наличием буферных слоев с низкой теплопроводностью и большой толщиной самой подложки. Эти факторы делают время выравнивания температуры при нагреве со стороны подложки существенно большим, чем в случае нагрева излучением с внешней стороны проводника. Использование технологии «горячей стены» позволило увеличить толщину ВТСП слоя до 6 мкм без ощутимого падения критической плотности тока (см. рис. 4.)

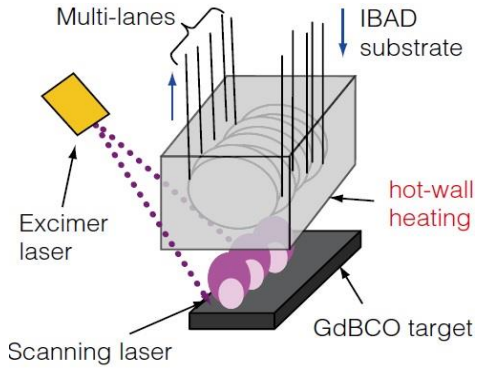

Рис. 3. Схема PLD напыления с нагревателями «горячей стены»

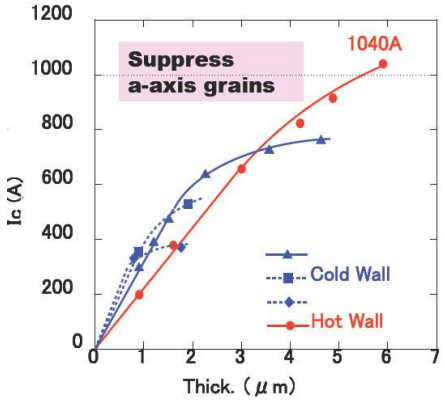

Рис. 4. Зависимостей критического тока ВТСП лент от толщины ВТСП слоя, технология Hot-Wall показывает значительно лучший результат.

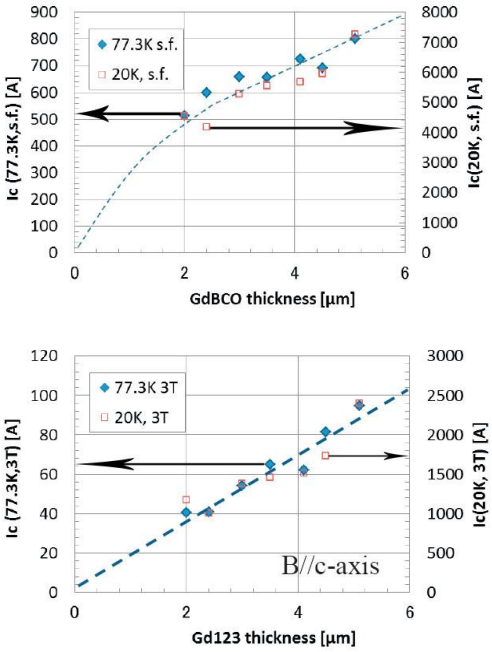

Рис. 5. Зависимости критического тока от толщины сверхпроводящего слоя при 77,3К и 20К снятые в собственном поле и во внешнем поле 3Тл

Стоит обратить внимание, что зависимости критического тока от толщины ВТСП слоя в собственном магнитном поле при 77К и 20К выходит на насыщение (см. рис. 5), тогда как аналогичные зависимости, измеренные во внешнем поле 3Тл, практически линейны. Очевидно, что такие ВТСП проводники целесообразно использовать в сильных магнитных полях.

Компания Fujikura пошла по пути увеличения толщины сверхпроводящего слоя и достигла значения критического тока на уровне 930 А/см (77 К в собственном поле) при рекордной толщине ВТСП слоя в 5,5 мкм и длине отрезка 100 м [4]. Величина анизотропии критических свойств составляет около 2,5, что достаточно хорошо для проводника без дополнительных центров пининнга.

Для практического использования ВТСП лент необходимо осуществлять контроль их критических свойств не только при 77К в собственном поле, но и в широком диапазоне температур во внешних магнитных полях. Естественно, подобные измерения сложно реализовать для всей длины проводника, поэтому измерения производятся на коротких образцах, отбираемых через каждые 100 м или более (см. Рис. 6). К сожалению, данные измерения не дают возможности определить характеристики по всей длине проводника. Такой метод можно использовать лишь вместе с непрерывным измерением датчиками Холла критического тока при 77К. Неоднородность критических свойств для кусков проводника длиной 500 м не превышает 1,5%. При понижении температуры критический ток увеличивается, однако, увеличивается и степень его неоднородности по длине проводника, для ВТСП лент длиной 1050м она достигает 5 % (см. Рис. 6).

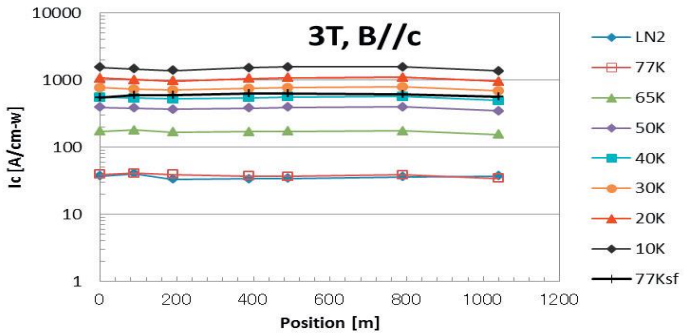

Рис. 6. Однородности токонесущей способности в магнитном поле 3 Тл в широком диапазоне температур.

Прилагаются усилия по созданию ВТСП-2 проводников с улучшенным пининнгом для работы в высоких магнитных полях. Исследования, проведенные на GdBaCuO пленках толщиной 1 мкм показали, что легирование наностержнями из ВНО ($BaHfO_3$) дает возможность увеличить величину верхнего критического поля при 77 К на 40% по отношению к нелегированному материалу (черная кривая на Рис. 7), а также увеличить максимальную объемную силу пиннинга в 2 раза (синяя кривая на Рис 7). Данные зависимости были получены путем измерения релаксационным методом вольт-амперных характеристик в магнитном поле [2]. Однако, дальнейшее добавление центров пиннинга ухудшило силу пининга в ВТСП пленке, что указы-

вает на наличие оптимального значения концентрации наностержней.

В 2013 г. руководством компании Fujikura была поставлена цель к 2015 году достигнуть критического тока в 700 А/см (при 77К в собственном поле) в отрезках проводника длиной более 1000 м [1]. На 2013 г. рекорд компании составлял: 572 А/см при длине 816 м (77К в собственном поле). В настоящее время отрезки проводника длиной более 1 км и критическим током более 600 А/см выпускаются серийно, что позволяет говорить о значительном развитии технологии.

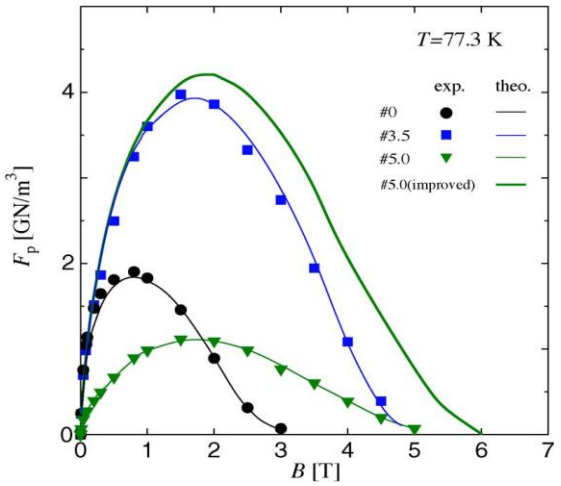

Рис. 7. Зависимости объёмной плотность силы пининнга от внешнего магнитного поля.

О.И. Свистунова

1. *Yasuhiro Iijima. High-Performance Y-based Superconducting Wire and Their Applications, Fujikura Technical Review, 2013.*

2. *T. Matsushita, H. Nagamizu, K. Tanabe, M. Kiuchi, E. S. Otabe, H. Tobita, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara, D. Yokoe, T. Kato, and T. Hirayama. Flux Pinning Properties of BHO Pinning Centers at High Magnetic Fields in GdBCO Coated Conductors, IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 23, no. 3, june 2013.*

3. *Takahiro Taneda, Masateru Yoshizumi, Takahiko Takahashi, Reiji Kuriki, Takaomi Shinozaki, Teruo Izumi, Yuh Shiohara, Yasuhiro Iijima, Takashi Saitoh, Ryuji Yoshida, Takeharu Kato, Tsukasa Hirayama, and Takanobu Kiss. Mechanism of Self-Epitaxy in Buffer Layer for Coated Conductors. IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 23, no. 3, june 2013.*

4. *S Fujita, M Daibo, M Igarashi, R Kikutake, K Kakimoto, Y Iijima, M Itoh and T Saitoh. In-field critical current property of IBAD/PLD coated conductors. 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013)*

ДИБОРИД МАГНИЯ MgB_2

Прогресс в технологии производства MgB_2 проводников и устройств на их основе

Технологии синтеза открытого в 2001 г. сверхпроводящего соединения диборида магния стремительно развиваются. Возможность работы сверхпроводниковых устройств при температуре жидкого водорода, малая плотность - 1,3 г/см^3, низкая по сравнению с ВТСП анизотропия токонесущей способности в магнитном поле, дешевизна исходных компонентов и недорогая технология производства делают MgB_2 весьма интересным с коммерческой точки зрения материалом. Низкая скорость релаксации магнитного поля (около 2,5 % в 6 Тл при 10 К), делает привлекательным использование MgB_2 для МРТ и ЯМР магнитных систем, где крайне важна временная стабильность магнитного поля.

Первоначально проводники из MgB_2 производились по *ex-situ* технологии: порошок MgB_2 прессуется в трубке, которая затем подвергается протяжке, волочению и отжигу. Сейчас компания Columbus Superconductors производит около 3000 км одножильного MgB_2 проводника в год по технологии порошок в трубе *ex-situ*.

Основной проблемой *ex-situ* MgB_2 проводников является низкий фактор заполнения: в процессе прессования и протяжки между MgB_2 гранулами остаются пустоты, поэтому плотность тока может быть достаточно далека от своего предела.

Значительного улучшения свойств MgB_2 проводников удалось добиться при переходе к технологии in-situ, когда смешиваются порошки магния и бора, а синтез происходит в ходе дальнейшей обработки: протяжки и отжига. Химическая реакция при in-situ процессе идет при меньшей температуре (650 ^{0}C вместо 900 ^{0}C для *ex-situ*), что также является технологическим преимуществом. Технология in-situ освоена компанией Hyper Tech Research Inc., по состоянию на 2011 г., объем производства для одножильного проводника достигал 10000 - 15000 км в год.

Более высокие значения токонесущей способности MgB_2 проводников, изготовленных по *in-situ* технологии, продемонстрированы на рис. 1. Для полученных по *ex-situ* технологии проводников (розовые ромбы) токонесущая способность в 2-2,5 раза меньше, чем для *in-situ* проводов (синие круги на рис. 1).

В свою очередь, *in-situ* процесс, подразделяется на 1-е и 2-е поколения. Если для 1-го поколения *in-situ* в синтезе участвуют помещенные в трубу порошки магния и бора, то образование MgB_2 в проводах 2-го поколения связано с твердофазной диффузией бора из порошка в магниевый стержень, размещенный в центре заготовки проводника (см. рис. 2.).

Следует отметить, что процесс синтеза MgB_2 2-го поколения весьма схож с «бронзовой технологией» для Nb_3Sn проводников. Несмотря на то, что MgB_2 образуется лишь на границе между стержнем и порошком, в достаточно тонком слое, инженерная плотность тока стрендов оказывается в 2-4 раза выше, чем для *ex-situ* процесса и in-situ процесса проводников 1-го поколения, что дает основание надеяться на создание в ближайшее время на базе MgB_2 магнитных систем с индукцией до 5 Тл при 20 К и до 11 Тл при 4,2 К.

Дополнительно повысить критический ток в MgB_2 проводниках можно путем их легирования углеродом, карбидом кремния и рядом других веществ, например искусственные центры пиннинга в виде частиц Dy_2O_3 позволяют увеличить критический ток на 30 % [2].

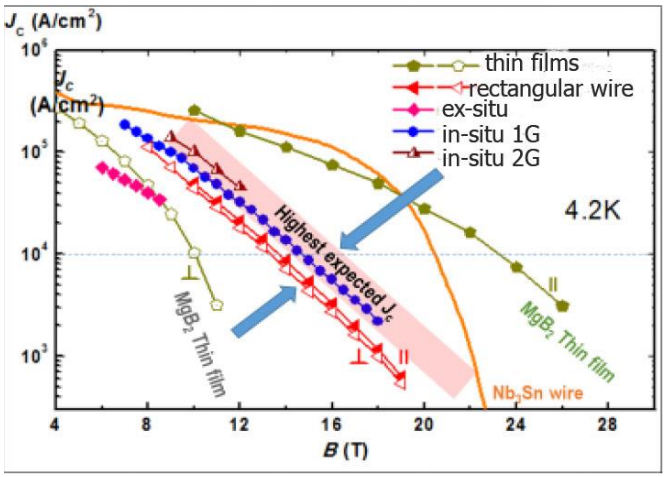

Рис. 1. Полевые зависимости токонесущей способности при 4,2 К для MgB_2 проводов, изготовленных по различным технологиям: розовые ромбы - *ex-situ*, синие круги - *in-situ* 1-го поколения, коричневые треугольники - *in-situ* 2-го поколения [1].

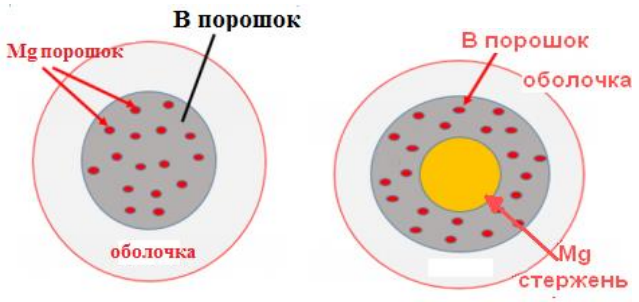

Рис. 2. *in-situ* MgB_2 проводники 1-го (слева) и 2-го поколения (справа) [1].

Переход к *in-situ* технологии позволит также решить вопрос механической прочности MgB_2 проводников: японские и американские исследователи продемонстрировали, что *in-situ* технология позволяет получать MgB_2 стренды диаметром 0,5 мм, которые можно навивать с шагом 12-20 мм на формер диаметром около 1 мм без падения критических свойств [3,4].

Уплотнение сверхпроводящих обмоток путем гидростатического прессования (см. рис. 3) позволяет полностью решить проблему пористости в MgB_2 стрендах, работы в этом направлении ведутся в университете Женевы [1]. Сверхпроводящая обмотка помещается в пресс с усилием сжатия до 3000 тонн. Нагружение происходит в солевом расплаве непосредственно перед отжигом с температурой 550-750 ^{0}C, за счет чего в стренде достигается изостатическое давление на уровне 1,4 ГПа, что приводит практически к двукратному росту токонесущей способности. Очевидно, это связано с уплотнением материала и ликвидацией пористости.

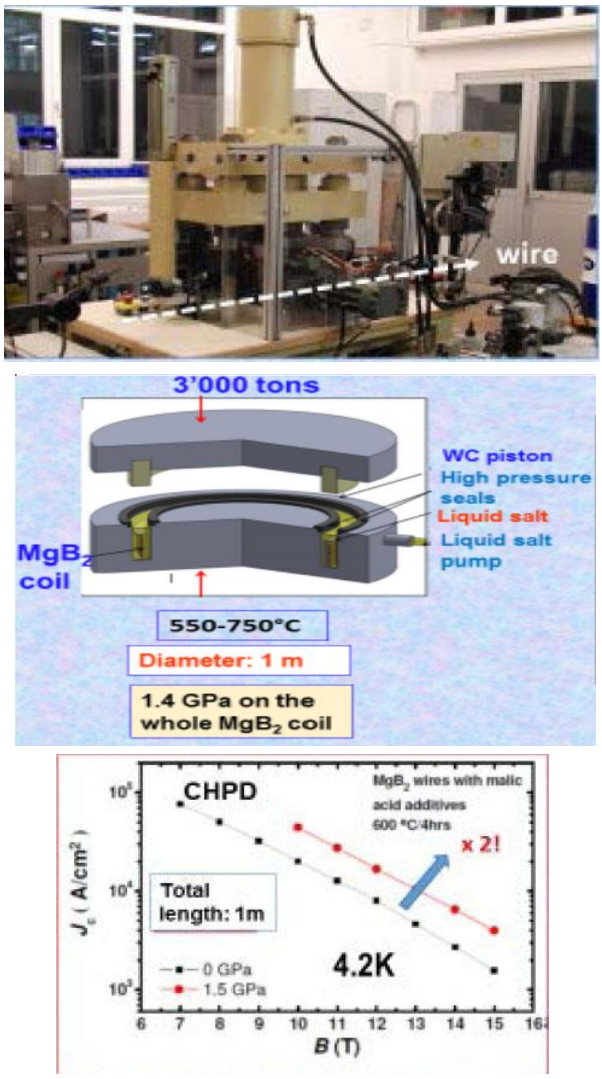

Рис. 3. Установка для гидростатического прессования, ее схема. При помощи гидростатического прессования (красная кривая) можно добиться рекордной инженерной плотности тока в 10 кА/см^2 в 14 Тл при 4,2 К [1].

По оценке компании Hyper Tech Research Inc., к 2018 г. стоимость проводов на основе диборида магния для кабелей (1 Тл при 20 К) будет находиться на уровне 1 доллар США/кА·м. Также, ожидается, что стоимость проводника для МРТ (3 Тл при 20 К) будет составлять 2,5 доллара/кА·м.

В настоящее время стоимость MgB_2 стрендов составляет около 10 долларов/кА·м, что ниже чем для Nb_3Sn (около 20 евро/кА·м), и намного ниже, чем

для ВТСП как 1-го, так и 2-го поколений. Сейчас массово выпускаются MgB_2 стренды с длинами отрезков по 6-10 км. В ближайшие три года планируется окончательный переход на in-situ технологию 2-го поколения с увеличением длины единичного отрезка до 40-60 км, что позволит более чем в 5-8 раз снизить производственные затраты. При увеличении длины единичного отрезка до 80 км, затраты снизятся еще в 2-3 раза. Однако для реализации столь смелых планов необходимы новые технологические подходы: например, непрерывная свертка трубки из ленты с одновременной подачей в нее магниевого стержня и засыпкой порошка бора.

Вместе с прогрессом в технологии производства проводов MgB_2 неуклонно растет количество устройств на их основе. Первыми устройствами на базе MgB_2 стали созданные еще в 2005 г. в KIT (институт технологий Карлсруэ, Германия) токовводы (от 17 К до 1,3 К), в виде тонких проводников (300 мкм) для работающего на спутнике рентгеновского детектора. В настоящее время центральное место среди применений MgB_2 проводников занимают кабели и магнитные системы для МРТ, остановимся более подробно на некоторых из них.

MgB_2 кабели в ЦЕРНе

Модернизация большого адронного коллайдера (БАК) потребует увеличения рабочих токов его магнитной системы. Источники питания удалены от магнитов коллайдера на расстояние 300-500 м. Суммарный ток диполей, квадруполей и магнитов детекторов коллайдера чрезвычайно высок и достигают сотен кА, для его передачи без потерь необходима система сверхпроводящих кабелей, которая разрабатывается в ЦЕРН под руководством Amalia Ballarino [6]. В сверхпроводящих кабелях предполагается использовать как ВТСП, так и MgB_2 проводники.

Для питания секций коллайдера, в которых расположены детекторы ATLAS и CMS, предполагается использовать сборку кабелей из диборида магния с общим током 150 кА [6]. Сборка кабелей имеет 60 мм в диаметре, а с учетом криостата внешний диаметр достигнет 220 мм. Масса погонного метра кабельной сборки составит 11 кг. В состав сборки для питания диполей входит шесть кабелей с током 20 кА, четырнадцать кабелей с током 3 кА, восемнадцать с током 120 А и четыре на 400 А (Рис. 4). Работы над кабельной сборкой будет завершены к 2020 году, для ее изготовления понадобится 1000 км сверхпроводника.

В феврале 2014 г. в ЦЕРНе был продемонстрирован прототип MgB_2 кабеля с током 20 кА при 24 К, длина кабеля составляла 20 м. Кабель был изготовлен из ex-situ стрендов диаметром 0,98 мм производства компании Columbus Superconductors. Каждый из стрендов состоял из 30 жил, разделенных ниобиевым барьером. Для охлаждения использовался газообразный гелий, что позволило достичь однородности температуры по длине кабеля менее 1 К.

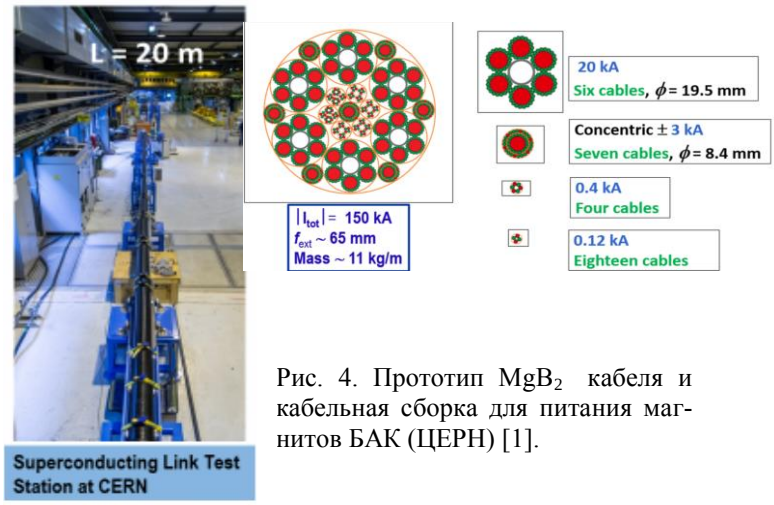

Рис. 4. Прототип MgB_2 кабеля и кабельная сборка для питания магнитов БАК (ЦЕРН) [1].

MgB_2 для МРТ

Несколько последних лет в Италии компаниями ASG (Animal Specialty Group) и Paramed Medical Systems ведется мелкосерийное производство томографов с обмотками из диборида магния. Из MgB_2 проводников производства Columbus Superconductors уже изготовлено более 28 открытых томографов с полем 0,5 Тл. Для изготовления одного томографа требуется 18 км MgB_2 провода в виде 12-ти жильной ленты шириной 3,5 мм и толщиной 0,65 мм. Максимальное поле на обмотке достигает 1,3 Тл. Рабочий ток обмоток составляет 90 А. Температура поддерживается на уровне 20 К при помощи двух криокулеров, жидкий хладагент не используется. Первый такой томограф был изготовлен в 2006 г.

Рис. 5. Открытый МРТ с индукцией 0,5 Тл на основе диборида магния и сечение используемого в нем проводника [1].

В результате улучшения свойств MgB_2 проводников сейчас стало возможным создание работающей при температуре 10 К магнитной системы для МРТ всего тела с полем 1,5 Тл [5]. Внутренний диаметр магнита составит 1 м, при максимальном поле на обмотке 5,4 Тл.

Практически во всех МРТ магнитные системы работают в режиме «замороженного» потока, для чего необходима надежная технология изготовления низкоомных контактов. Исследовательская группа под руководством профессора Ивасы предложила способ изготовления низкоомных контактов из MgB_2. По технологии «намотка» - «отжиг» была изготовлена модельная обмотка, для ее намотки использовались 18-ти жильные проводники производства HyperTech Research Inc., концы которых очищались от стабилизатора и оболочки, после чего запрессовывались в трубки, заполненные порошками магния и бора (Рис. 6). Синтез диборида магния в контактах и самой обмотке происходил одновременно в ходе отжига. Сопротивление контактов, составило менее 10^{-14} Ом, что вполне достаточно для использования в МРТ. Также был разработан сверхпроводящий ключ на основе MgB_2.

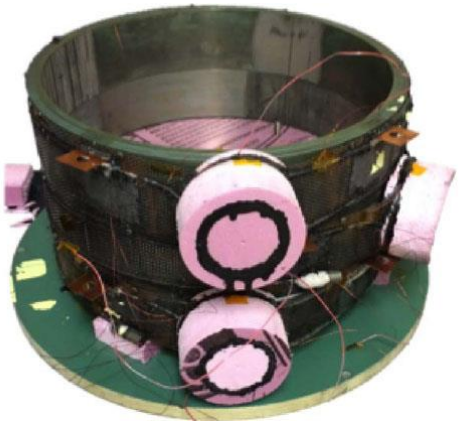

Рис. 6. Опытный образец МРТ обмотки из MgB_2 с низкоомными контактами и сверхпроводящим ключом [7].

MgB_2 ветрогенераторы и сверхпроводниковые накопители энергии, СПИН

Согласно планам Евросоюза, в ближайшие годы планируется увеличение вклада возобновляемых источников в энергетику, что будет достигнуто, в основном, за счет строительства прибрежных ветрогенераторов. Сейчас разрабатывается сразу несколько проектов ветрогенераторов мощностью 10 МВт (рис. 7), как на основе ВТСП проводников так и с использованием MgB_2. Компания Kalsi Green Power Systems (Princeton, USA) предлагает конструкцию ветрогенератора со сверхпроводящими ротором и статором. В конструкции предполагается использовать MgB_2 проводники 2-го поколения, рабочая температура обмоток будет на уровне 15-20 К. Полный вес генератора составит около 50 тонн, что выгодно отличает его от большинства проектов на основе ВТСП, в которых из сверхпроводника выполнен лишь ротор, а статор имеет традиционное исполнение и поэтому весьма массивен [8].

В рамках японской программы «Усовершенствованная Сверхпроводящая Система Стабилизации Энергии» ведется разработка охлаждаемого жидким водородом СПИН из MgB_2 с запасенной энергией 100 МДж и выходной мощностью 1 МВт [9]. СПИН будет выполнен в виде тороида из 12 секций, внешний диаметр тора составит 12 м. Для изготовления накопителя энергии предполагается использовать проводник производства HyperTech Research Inc., с критическим током стренда 100 А в поле 3 Тл при 20 К. Токонесущий элемент, из которого будут изготовлены обмотки, представляет собой скрутку из 96 MgB_2 стрендов, рабочий ток СПИН достигает 4 кА. В зависимости от прогресса в токонесущей способности MgB_2 проводников магнитное поле СПИН будет составлять либо 2 Тл, либо 5 Тл, во втором случае для реализации проекта потребуется в 1,3 раза меньше сверхпроводника (расход проводника также определяется, исходя из допустимого уровня механических напряжений в обмотке).

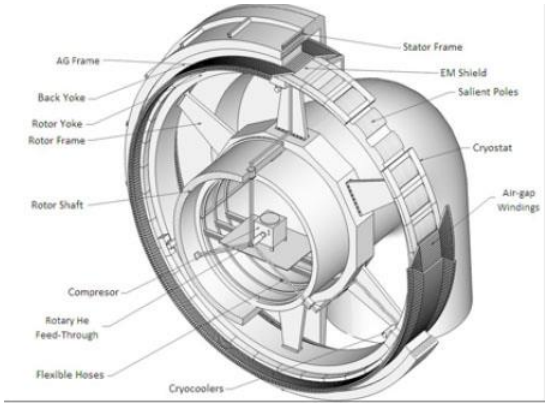

Рис. 7. Проект 10 МВт ветрогенератора на основе MgB_2 [1].

Также на основе MgB_2 разрабатывается большое число других сверхпроводниковых устройств, среди которых: сверхпроводящие уровнемеры для измерения уровня жидкого водорода; электродвигатели для полностью электрических самолетов, магнитные экраны для радиационной защиты космических аппаратов, устройства индукционного нагрева и многое другое.

В.С. Коротков

1. *R. Flukiger, Applied Superconductivity Conference, (2014).*

2. *G. Z. Li, M. D. Sumption, M. A. Rindfleisch, C. J. Thong, M. J. Tomsic and E. W. Collings, Applied Physics Letters* ***105****, 112603 (2014).*

3. *S. A. Hossain, A. A. Gazder, S. Barua, A. Motaman, D. Patel, J.-H. Kim, A. Kario, , M. B. Ringsdorf, B. Runtsch, A. Jung, M. Rindfleisch, S.-X. Dou, and W. Goldacker, IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ***24****, 620030 (2014).*

4. *T. Holubek, S. I. Schlachter, W. Goldacker, Superconductor Science Technology* ***22****, 055011 (2009).*

5. *W. Yao, J. Bascuñán, S. Hahn, and Y. Iwasa, IEEE Transactions Applied Superconductivity* ***20****, 756 (2010).*

6. *A. Ballarino, Superconductor Science Technology* ***27****, (2014).*

7. *J. Ling, J. P. Voccio, S. Hahn, Y. Kim, J. Song, J. Bascunan, Y. Iwasa, IEEE Transactions Applied Superconductivity* ***25,*** *4601705 (2015).*

8. *S. S. Kalsi, IEEE Transactions Applied Superconductivity* ***24****, 5201907 (2014).*

9. *T. Shintomi, T. Asami, G.Suzuki, IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ***23*** *,570030 (2013).*

Отделение сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий

Сайт «Сверхпроводники в электроэнергетике»

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

Научный редактор: *В.С. Круглов,* руководитель отделения сверхпроводимости

Редактор: *В.И. Щербаков*

В подготовке выпуска принимали участие: *П.Н. Дегтяренко, В.С. Коротков, О.И. Свистунова*

А.К. Чернышева Chernyshova_AK@nrcki/.ru,
Верстка: *И.Л. Фурлетова*