



Том 8 выпуск 3
июль 2011

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Методы изготовления ВТСП-провода 2-го поколения: краткий обзор

Чтобы найти широкое применение ВТСП-провода 2-го поколения должны стать дешевле, доступнее. Причем не просто дешевле, а в 5, в 10, в 20 раз дешевле. Эту прописную истину сегодня можно услышать на любой конференции или семинаре по сверхпроводимости.

Современная ВТСП-лента 2-го поколения - продукт высоких технологий. Вклад в её стоимость *материалов*, из которых она состоит, на сегодня ничтожен, составляя менее 1 %. Если исключить из рассмотрения мотивы нетехнические, то получается, что стоимость ленты определяется полностью стоимостью *технологии*, по которой она произведена. И с развитием технологии, с нахождением более эффективных технических решений, с уменьшением процента брака, с увеличением объемов производства, цена ленты должна приближаться к стоимости материалов. Такую ситуацию мы видим для Nb-Ti и Nb₃Sn [1], а также ВТСП-проводов первого поколения. И в этом смысле ВТСП-лентам 2-го поколения "есть куда расти", точнее падать.

На Рис.1 представлены данные фирмы SuperPower о динамике изменения стоимости их ВТСП-ленты, приведённой к её токонесущей способности [2]. Что характерно, за последние 3 года цена провода за метр (фактически, стоимость продукта относительно материалов) не изменялась - росли лишь характеристики, давая снижение в приведенном значении стоимости. Довольно очевидно, что токонесущая способность ВТСП-лент вряд ли увеличится в ближайшем будущем в 10 раз, так что, вероятно, в рамках данной компании мы будем наблюдать постепенное снижение приведенной стоимости.

Довольно очевидно, что кардинальные снижения стоимости ленты возможны только при активном поиске более простых и эффективных способов получения ВТСП-лент. Сложность архитектуры этих многослойных материалов обуславливает и большое количество путей, которыми можно прийти к искомому результату.

Давайте посмотрим, какова ситуация в мире с технологиями производства ВТСП-лент 2-го поколения? На этот раз технических деталей процессов касаться не будем, а отметим основные достижения и ограничения. Каких-то важных аспектов (например, всего, связанного с лентой-подложкой) намеренно не будем касаться, ограничимся методами нанесения пленок.

И далее...

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 2-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Взгляд потребителя ВТСП-провода (примечание редактора)

6

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 1-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Влияние пористости Bi2212 проводников на критическую плотность тока

7

ПОЗИЦИЯ

Профессор Венкат Сельваманикан о перспективах современной сверхпроводимости

8

Пол Чу: проблемы развития теории ВТСП и поиск новых сверхпроводящих материалов

9

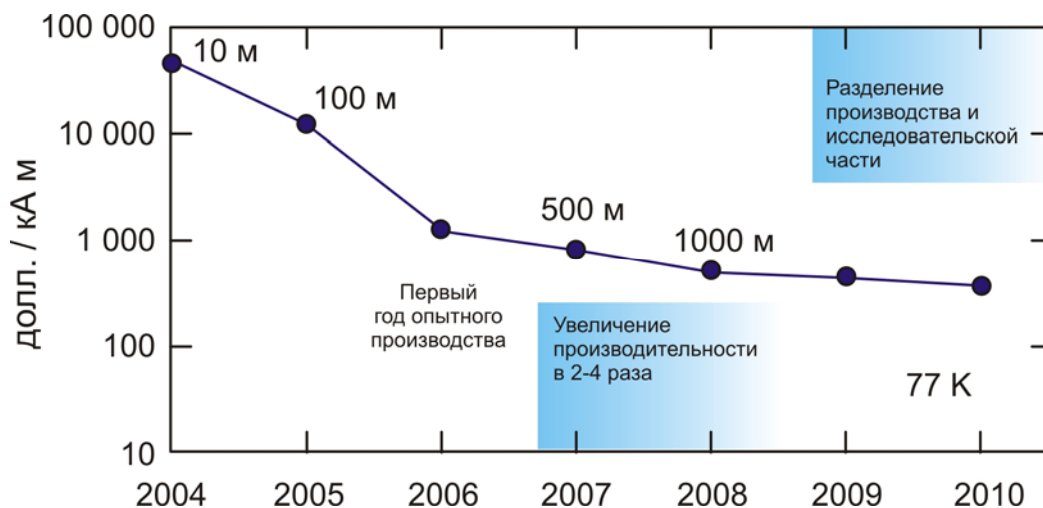


Рис. 1. Стоимость ВТСП-ленты 2-го поколения производства компании SuperPower.

IBAD

Метод получения текстурированных слоев на поликристаллических подложках посредством ассистирования ионным пучком был впервые применен для получения буферных слоев 20 лет назад учёными фирмы Fujikura [3]. С этого момента, наверное, и можно отсчитывать историю ВТСП-проводов 2-го поколения. Этот метод получил бурное развитие в Германии усилиями исследователей Гёттингенского Университета, а позднее фирмы EST-Bruker, в Японии силами ISTECS и фирмы Fujikura, в США - силами лабораторий в Стенфорде и Лос Аламосе, а также фирмы SuperPower и, наконец, корейской компании SunAm. Методом IBAD можно получать текстурированные покрытия самых разных соединений - $ZrO_2(Y_2O_3)$, $ZrO_2(Gd_2O_3)$, CaF_2 , MgO , TiN . Исторически, первым материалом для ВТСП-проводов послужил $ZrO_2(Y_2O_3)$, или YSZ. Этот материал до сих пор используется немецкой компанией Bruker и активно разрабатывался японцами до середины 2000-х, в т.ч., в виде вариации, в которой вместо иттрия используется гадолиний. Однако оказалось, что оксид магния, MgO , текстурируется под действием ионного пучка гораздо быстрее (Рис.2). Это позволяет выращивать текстурированные пленки толщиной всего в 10 нм. Аналогичное поведение демонстрирует нитрид титана, обладающей той же кристаллической структурой, что и MgO [4].

Именно с использованием IBAD-MgO добились впечатляющих успехов компании SuperPower (ВТСП-ленты длиной более 1 км с криттоком более 200А [5]) и Fujikura (февраль 2011 - 816.4 м и 872А [6]). Имеются сведения о значительных успехах корейской компании SunAm в этом направлении. Можно сказать, что на сегодняшний день лучшие результаты достигнуты именно на буферных слоях из оксида магния, полученных методом IBAD.

“Флюоритный” (со структурой флюорита) вариант IBAD продолжает развивать фирма Bruker, активно инвестирующая в последние несколько лет в свою технологию (вариант используемого сейчас в Bruker’е метода называется ABAD) [7]. Недостатком этого подхода остаётся большая толщина слоя $ZrO_2(Y_2O_3)$ – более 1 мкм, который необходимо получить для достижения приемлемой текстуры.

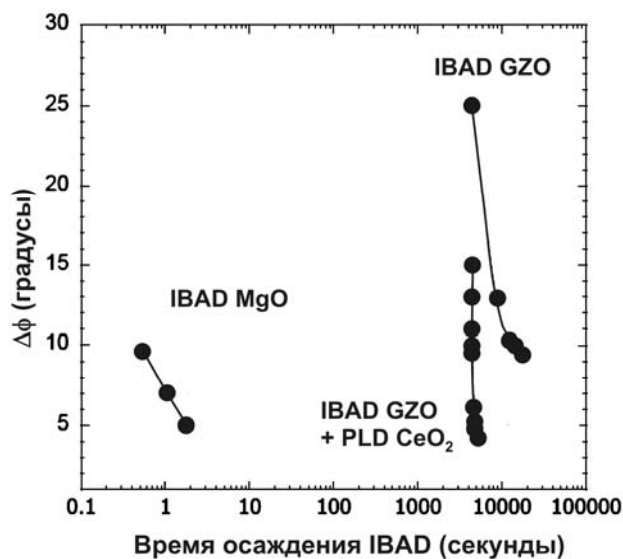


Рис. 2. Текстура слоев в плоскости подложки в зависимости от времени роста методом IBAD.

С точки зрения капитальных вложений, метод IBAD нельзя отнести к доступным способам получения буферных слоев. Основной вклад в стоимость процесса IBAD вносит большая стоимость ионного источника и расходных материалов к нему. Необходимый при процессе высокий вакуум тоже не является пока что доступной опцией. Достоинством метода является то, что тонкие пленки соединений со структурой каменной соли, и в первую очередь MgO , могут быть выращены с помощью этого метода очень быстро. По расчетам японских специалистов, в стоимость сверхпроводящей ленты струк-

туры GdBCO/ LMO / CeO₂ / IBAD-MgO / GZO /IBAD этот этап вносит лишь 3% (Рис.3).

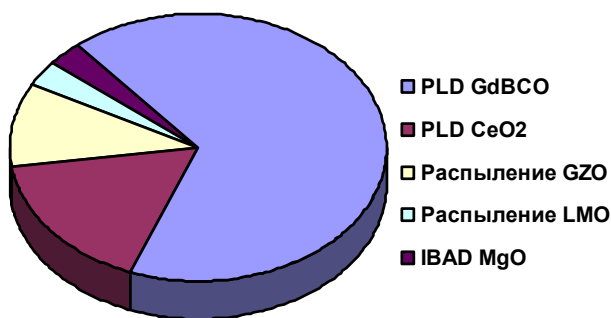


Рис. 3. Вклад технологий осаждения в стоимость ВТСП-ленты по данным японских исследователей [8].

Важно отметить, что для получения высокотекстурованных пленок MgO необходима высокая гладкость подложки ($R_a < 1$ нм). Достичь её можно либо электрополированием, либо предложенным несколько лет назад методом растворной планаризации (SDP). Это дополнительные стадии, которые всегда нужно иметь в виду, сравнивая IBAD с другими методами.

MOD / SDP буферных слоев

Метод металлограничного (MOD) разложения для получения пленок ВТСП и буферных слоев активно развивался в США, начиная с конца 80-х годов, в первую очередь, в национальной лаборатории в Оак Ридже. Позже, существенное внимание этому методу было уделено в Германии (IFW Dresden, Nexans Superconductors, Zenergy Power), Испании (ICMAB Barcelona), Японии и Корее. Большое внимание промышленной реализации процесса было уделено компанией American Superconductor. Привлекательным в методе является отсутствие необходимости в вакууме. В то же время, относительно большое время конверсии аморфного прекурсора в эпитаксиальную пленку существенно осложняет оборудование, необходимое для реализации этого процесса. Как правило, для его осуществления конструируются большого размера высокотемпературные печи, оборудованные сложным газораспределительным оборудованием для равномерного «обдува» ленты газом заданного состава. На свойства слоя сильно влияют состав атмосферы, в особенности содержание паров воды и кислорода. Все эти аспекты делают процесс менее тривиальным.

Если говорить о буферных слоях, то наилучших успехов исследователям удалось добиться на подложках из чистого никеля или сплава никеля с вольфрамом. Лучше всего текстурируются оксиды со структурой флюорита (CeO₂) или пироклора (La₂Zr₂O₇). Технические детали осуществления этого процесса доступны и содержатся в многочисленных публикациях и отчетах ученых из Оак Риджа.

Европейская компания Zenergy Power планирует создание собственной технологии, базируясь только на методе MOD. Такой же стратегии придерживалась фирма Nexans Superconductor, но этот проект был закрыт около года назад. Химические методы осаждения долго рассматривались как перспективные фирмой American Superconductor, но пока фирма использует для получения буферной структуры CeO₂/YSZ/Y₂O₃/Ni₅W реакционное распыление [9].

Несколько особняком стоит процесс растворной планаризации (SDP). Этот совсем недавно предложенный метод позволяет получать очень гладкие аморфные слои оксида иттрия и служит заменой электрополирования ленты из хастеллоя перед осаждением на неё слоя IBAD MgO. Интересно, что применение SDP-слоя позволяет «начать процесс заново», нанося новую многослойную структуру прямо на готовый ВТСП-провод. Аморфный оксидный слой, нанесенный из раствора, заглаживает неровности поверхности, делая её пригодной для нового осаждения IBAD MgO. Применяя этот подход, ученым из Лос Аламоса удалось достичь структур, содержащих два ВТСП-слоя с общим критическим током 725 А/см ширины [10].

В той или иной мере развитием растворных методов занимаются несколько лабораторий в Европе, США и Азии.

MOD ВТСП

Наиболее впечатляющих успехов в этой области добилась компания American Superconductor, использующая разработки Оак Риджской лаборатории. Уже в течение нескольких лет компания изготавливает ВТСП-ленту с длинами в несколько сотен метров и весьма высокими сверхпроводящими характеристиками (критток выше 300 А на 1 см ширины). Необходимо также вспомнить ряд исследований, указывающих на то, что падение критического тока с увеличением разориентации соседних зёрен в MOD-ВТСП пленках происходит медленнее, чем обычно, благодаря образованию развитой поверхности границы [11].

Так же, как и с буферными слоями, для получения слоя ВТСП с хорошими характеристиками необходимо не вакуумное, но громоздкое отжигающее оборудование с тщательно контролируемой атмосферой. В 2008-м году именно этот процесс был одним из самых медленных в технологическом цикле American Superconductor (Рис.4). В настоящее время эта крупная компания, однако, переживает довольно плохие времена в финансовом смысле в связи с неудачами в ветрогенераторном бизнесе. Так что возможно, что новостей о продвижении в направлении процесса MOD придется подождать.

Развитием растворной технологии осаждения ВТСП занимается также Zenergy Power, но успехи этой фирмы пока находятся на лабораторном уровне.

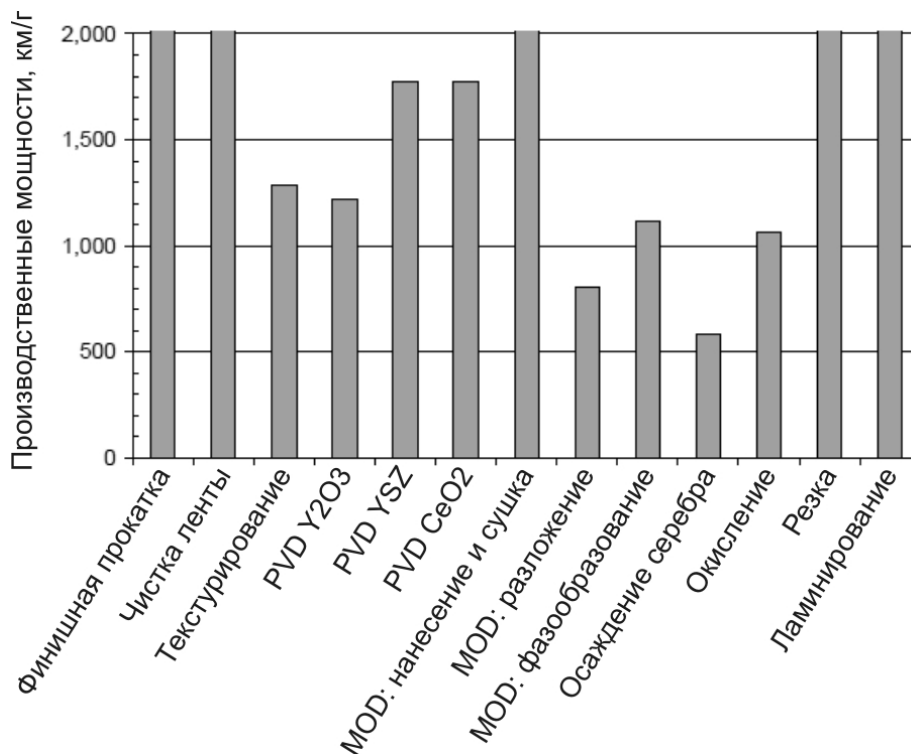


Рис. 4. Продемонстрированная производительность различных стадий производства ВТСП-провода в American Superconductor (данные 2008 г.).

ISD

Для полноты картины необходимо упомянуть метод осаждения на наклонную подложку, который используется немецкой компанией Theva для роста ориентированных буферных слоев оксида магния на нетекстурированных металлических лентах. В чем-то это аналог метода IBAD, но необходимая толщина слоя оксида составляет более 2 мкм, что заметно снижает производительность. Метод относится к высоковакуумным и требует традиционно дорогого оборудования.

RCE

Реактивное термическое со-испарение используется для получения слоев ВТСП очень давно и достаточно успешно. Первые работы по применению этого метода были выполнены в Университете Мюнхена в начале 90-х и легли в основу процесса осаждения ВТСП-слоев фирмой Theva. Уже тогда отмечалось, что с помощью этого метода ВТСП-слой высокого качества может быть выращен прямо на поверхности оксида магния без дополнительных буферных слоев. Вторым очень важным преимуществом этого метода является возможность использовать для роста сравнительно низкие температуры (650-700°C), т.к. в большинстве других методов ВТСП слои растут при температурах выше 800°C. Это подразумевает заметно более низкие требования к подложкам и буферным слоям. Есть и третье достоинство метода – высокая скорость осаждения, достигающая 5 нм/с, т.е. более 15 мкм/час. Фирма Theva применяет метод RCE и сегодня, в основном,

для осаждения слоев ВТСП высокого качества на монокристаллические оксидные подложки большой площади. Такие пленки пользуются большим спросом и применяются для создания слаботочных устройств, в первую очередь, СВЧ-резонаторов, фильтров, линий задержки и т.д.

В американском варианте развитием похода активно занимается фирма STI (<http://www.suptech.com>) [12]. В 2010 и весной 2011 г. эта компания сообщила о больших успехах по криттоку на коротких образцах 4-микронной толщины, приготовленных в рамках совместной работы с Лос-Аламосом. На сегодня STI обладает экспериментальной установкой с длиной лент до 6м и создает оборудование для более масштабного производства ВТСП-провода (но сначала хотят дойти до 50 м) [13]. Что характерно, STI так же, как и Theva, ведёт осаждение ВТСП прямо на слой оксида магния, полученный методом IBAD. Это упрощает архитектуру буферных слоев и поэтому очень привлекательно.

Метод RCE используется для роста слоя ВТСП также корейской компанией SunAm, достигшей в последние годы неплохих результатов (ленты длиной до 100 м, критический ток 500А/см ширины ленты длиной 1 м). Корейцы занимались этим процессом в научных организациях, как минимум, с середины 2000-х. Их подход с технической точки зрения очень похож на американский [14].

Оборудование для этого метода также является весьма дорогим, так как предполагает использование высокого вакуума. Но главные достоинства ме-

тогда, такие как возможность низкотемпературного роста ВТСП с высокими скоростями осаждения, поддерживают неугасающий к нему интерес.

PLD

Наиболее последовательно лазерное осаждение используется для нанесения слоя ВТСП немецкой компанией Bruker [15] и японскими исследователями из Fujikura и ISTEK [16]. SuperPower в начале своей деятельности тоже применяла PLD [17]. Основные исследования были направлены на увеличение эффективности использования распыленного лазерным лучом материала. Такие подходы удалось найти. В результате, немцы свой метод называют высокоскоростным (HR-PLD), а японцы – напылением в факеле - "in plume PLD". Накопленный за годы работы опыт позволил увеличить скорость роста ВТСП в 3 раза и более. А значит, настолько же снизился вклад в стоимость провода работы лазера – наиболее дорогой части напылительной системы. Оптимизма по отношению к PLD-технологии добавляет и продолжающееся развитие лазерной техники, сопровождающееся весьма значительным снижением стоимости лазерных систем и эксплуатационных расходов [18]. С использованием этого метода, как правило, удается достичь очень высоких значений критического тока (см., например, недавние успехи Fujikura [6]).

MOCVD

Метод химического осаждения из паровой фазы наиболее сильное производственное развитие получил в американской компании SuperPower, которая является признанным лидером производства ВТСП-ленты 2-го поколения. Этот метод не относится к высоковакуумным методам и при этом обеспечивает очень высокие скорости роста эпитаксиальных покрытий. Фактически, габариты MOCVD-установок для получения ВТСП-провода ничем не отличаются от размеров высоковакуумных установок (Рис.5).

У метода есть, по сути, один недостаток - большое количество параметров, сильно влияющих на качество слоя. Именно поэтому для достижения высоких результатов с использованием этого метода требуются большие исследовательские усилия по сравнению с физическими методами осаждения. В то же время, метод MOCVD по аппаратурному оформлению и эксплуатационным расходам является весьма доступным, что позволяет надеяться на то, что он внесёт свой вклад в снижение стоимости ВТСП-провода в будущем.

Помимо SuperPower, в мире есть ещё несколько компаний поменьше, занимающихся развитием этой технологии - MetOx, PerCoTech, СуперОкс, про достижения последней компании планируется отдельная заметка. Главное отличие подхода этих компаний от пути SuperPower заключается в том, что эти компании используют метод MOCVD не

только для получения слоя ВТСП, но и для роста буферных слоев, а в SuperPower применяется буферная архитектура, полученная высоковакуумными, физическими, методами. Уровень развития технологии в вышеупомянутых компаниях позволяет говорить, что метод MOCVD подходит также и для роста буферных слоев высокого качества, хотя промышленный выпуск ВТСП-провода, полностью полученного по MOCVD технологии, пока не начал.



Рис. 5. Промышленная установка MOCVD для осаждения слоя ВТСП (SuperPower).

Вместо заключения

Конечно, на настоящем этапе невозможно сказать, какая из технологий осаждения слоёв наиболее выигрышная - слишком многофакторные получаются сравнения и слишком мал накопленный производственный опыт. На развитие тех или иных технологий в разных странах накладывают весьма заметные отпечатки экономические и политические факторы. Так, например, недавнее сворачивание финансирования исследований в области ВТСП-материалов министерством энергетики США снижает темп развития американских компаний и национальных лабораторий, в то время как сохраняющиеся национальные амбиции в Японии и Корее могут заметно повлиять на развитие технологий Fujikura и SunAm. Более чем вероятно, что разные методы осаждения будут ещё долгое время развиваться параллельно (и пересекаясь), обеспечивая производство ВТСП-провода 2-го поколения для развития рынка и реализации прототипов оборудования. Достаточно взглянуть на положение в смежной тонкоплёночной области - солнечных элементах - чтобы понять, что такое сосуществование в случае сложной современной технологии вполне оправдано. Нельзя исключить (даже - исходя из исследовательской логики - следует ожидать) появления новых синтетических подходов, призванных упростить производст-

во токонесущих ВТСП-лент. В той же фотовольтаике за последнее десятилетие появилось несколько жизнеспособных подходов, выросли новые большие фирмы, конкурирующие друг с другом и исповедующие совершенно разные технические подходы. Конечно, всё это невозможно без поддержания соответствующего уровня финансирования со стороны государства. Средства требуются немалые, но есть мнение, что вложения в развитие технологий ВТСП-проводов могут оказаться более чем обоснованными, так как доступный ВТСП-провод сделает генерацию электричества эффективной, а использование её - рациональным. Это важные сегодня задачи.

С.В.Самойленков

1. R.M.Scanlan, *Conductor cost/performance status report for Snowmass 2001*
2. http://www.superpower-inc.com/system/files/2011_0620+ENERMAT+Spain_TL+Web.pdf
3. Y. Iijima et al., *Applied Physics Letters*, vol. 60, pp. 769-771, 1992.
4. R. Hühne, *Physica C: Superconductivity, Volumes 426-431, Part 2, 1 October 2005, Pages 893-898*; Gartner et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 21 (2011) 2920.
5. http://www.superpower-inc.com/system/files/2011_0225+Barcelona+Wind+Seminar_Selva.pdf
6. http://www.fujikura.co.jp/eng/newsrelease/1199215_3501.html
7. <http://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/iot/2-ybco-coated-conductor-development-at-bruker-hts-status-and-outlook-a-usoskin.pdf>
8. <http://www.cca08.com/pdf/presentations/2B-02-YAMADA.pdf>
9. http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/pdf/LiX_3MA02.pdf
10. Jung et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 (2011) 2953.
11. http://www.stanford.edu/group/moler/rdinner/Dinner_APL_90_212501.pdf
12. Matias et al. *Superconductor Science and Technology*, 23 (2010) 014018
13. *SuperconductorWeek 2505 - 17 Apr 2011*
14. Ha et al., *Physica C* 463-465 (2007) 493
15. <http://www.cca08.com/pdf/presentations/2B-07-USOSKIN.pdf>
16. Miura et al., *Supercond. Sci. Technol.* 23 (2010) 014019
17. <http://www.superpower-inc.com/files/T303+ASC+Li.pdf>
18. <http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/excimer-primer.pdf>

Взгляд потребителя ВТСП-провода (примечание редактора)

Как показал продолжительный опыт работы с ВТСП материалами 2-го поколения, применимость данного ВТСП проводника для конкретной задачи определяется не только величиной критического тока при 77К и стоимостью 1 кА*м. Думаю, необходимость учета полевой зависимости критического тока при выборе ВТСП проводника для конкретного приложения понятна всем нашим читателям. Поэтому остановлюсь на двух менее очевидных примерах:

Величина допустимых механических напряжений в ВТСП проводнике определяет его применимость для магнитных систем с сильным полем (кстати, легированные ВТСП проводники SuperPower, которые обладают в 1,5-2 раза большей токонесущей способностью в поле 15 Тл при 4,2 К, чем нелегированные, уступают последним по критическому току при 77К на 10-20%). Величина механических напряжений также существенным образом влияет на технологию изготовления конечных ВТСП изделий. Существует однозначная зависимость между предельными механическими напряжениями и допустимым радиусом изгиба проводника. Низкие механические свойства проводника приводят к повышенному риску брака в процессе намотки и компаундирования катушек. Предельно допустимые механические напряжения для ВТСП проводов SuperPower составляют 550 МПа (по последним данным до 750 МПа), продукция Bruker выдерживает без утраты критических свойств до 650 МПа, а у проводников AMSC параметры значительно хуже – 150 МПа для провода Amperium, ламинированного медью, и 200 МПа для Amperium'a, ламинированного бронзой. Для того чтобы с такой ВТСП лентой можно было работать без риска ее повредить, в AMSC была разработана технология ламинирования проводника медной, латунной или нержавеющей фольгой, что, однако, привело к снижению конструктивной плотности тока и дополнительному удорожанию производства. Похоже, что низкие механические свойства являются отличительной особенностью всех ВТСП проводников с подложкой на основе Ni-W сплавов.

При разработке ВТСП токоограничителей одним из основных параметров становится величина удельного сопротивления проводника: чем оно выше, тем меньше сверхпроводника требуется для создания конечного устройства, однако при слишком высоком удельном сопротивлении проводник перегорает из-за возникновения "горячих" точек. Существуют различные варианты конструкции ВТСП проводника для токоограничителей: в AMSC ламинируют нестабилизированную ВТСП ленту нержавеющей фольгой; SuperPower производит специальный провод с тонким (1-2 мкм) слоем стабилизирующей меди поверх защитного серебряного покрытия; ряд

японских разработчиков просто наращивает толщину серебряного слоя. Разработка соответствующих технических решений, что у SuperPower, что у AMSC заняла не один год, а созданные ВТСП проводники поставляются лишь ограниченному числу партнеров. Опыт работы со свободно продаваемой SuperPower нестабилизированной лентой серии SF показал, что для того чтобы использовать данный проводник в ВТСП токоограничителе с ним необходимо проделать ряд дополнительных технологических операций.

Очевидно, что нельзя создать некий универсальный ВТСП проводник, который удовлетворит всех потенциальных потребителей. В ряде случаев для потребителя будет привлекательным более дорогой (за $\text{kA}\cdot\text{м}$) и слаботочный (при 77К) провод, обладающий лучшей полевой зависимостью при температурах 4,2-20К и хорошими механическими свойствами. Технология изготовления крупных обмоток из ВТСП проводов 2-го поколения пока находится в зачаточном состоянии, пока очевидно лишь, что вопросы сопротивления сая ВТСП лент, вероятности производственного брака, деградации критических свойств при компаундировании обмоток, и другие производственные «мелочи» могут стать решающими для выбора потребителя в пользу той или иной ВТСП ленты. Остается лишь надеяться, что разработка ВТСП лент будет вестись с учетом потребностей конечных потребителей, а производители смогут предложить широкий спектр проводников, оптимизированных для различных применений.

В.И.Щербаков

ВТСП МАТЕРИАЛЫ 1-го ПОКОЛЕНИЯ

Влияние пористости Bi2212 проводников критическую плотность тока

Ученые из Центра Прикладной Сверхпроводимости и Национальной Лаборатории Сильных Магнитных Полей, Государственный Университет Флориды, США, исследовали влияние пористости на критическую плотность тока в наиболее многообещающем для получения сильных магнитных полей ВТСП соединении $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi2212). Многожильные провода круглого сечения на основе Bi2212 изготавливаются по методу «порошок в трубке», при котором порошок Bi2212, находящийся в серебряных трубках, расплавляется, а затем медленно охлаждается с образованием зерен сверхпроводника.

Жилы в проводах, изготовленных таким методом, не совсем плотные, их остаточная пористость составляет примерно 30-40%. Как показали исследования ученых, поры внутри жил, находящихся в расплавленном состоянии, собираются в большие полости, диаметр которых может превосходить диаметр самих жил, таким образом, нарушается связность зерен Bi2212 и уменьшается критическая

плотность тока. Во время охлаждения проводника полости, ранее образовавшиеся при расплавлении, частично заполняются зернам Bi2212.

Для того чтобы выделить и исследовать микроструктуру отдельной жилы, а также исключить влияние связи между жилами на значения критических характеристик, был изготовлен специальный образец с меньшей плотностью жил, для этого часть сверхпроводящих жил в нем была заменена серебряными прутками. Изображения отдельной жилы после травли серебряной оболочки представлены на рис. 1. На поверхности жилы никаких полостей не видно, однако во внутренней микроструктуре, выявленной с помощью ионной микроскопии (FIB), даже после заполнения полостей зернами Bi2212, пористость структуры не исчезает, связность жил восстанавливается не полностью, что приводит к тому, что максимальная критическая плотность тока не достигается.

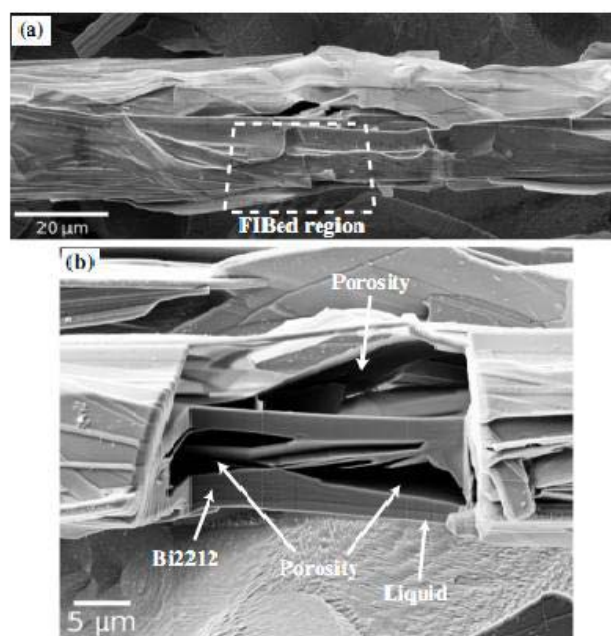


Рис. 1. Отдельно выделенная жила в момент формирования зерен Bi2212. (а) Изображение поверхности, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. (б) Изображение внутренней пористой микроструктуры, полученное с помощью ионной микроскопии.

Ученые исследовали влияние пористости на критическую плотность тока при различных скоростях охлаждения проводника. Микроструктура проводов исследовалась двумя способами: с помощью сканирующего электронного микроскопа и синхротронной рентгеновской микротомографии. Оба метода дают сходные результаты. Полости, возникающие из-за скопления пор в расплавленном состоянии, заполняются не полностью. Более того, во время тепловой обработки внутреннее давление газа, образующего поры, смещает расплав к концам провода, снижая плотность сверхпроводника в его центральной части, следовательно, уменьшается критическая плотность тока. Зависимость критической

плотности тока от пористости представлена на рис. 2. Значения пористости, представленные на графике, снимались в моменты образования зерен сверхпроводника внутри пор, так как неоднородность пор на этой стадии производства меньше, чем в готовых проводах.

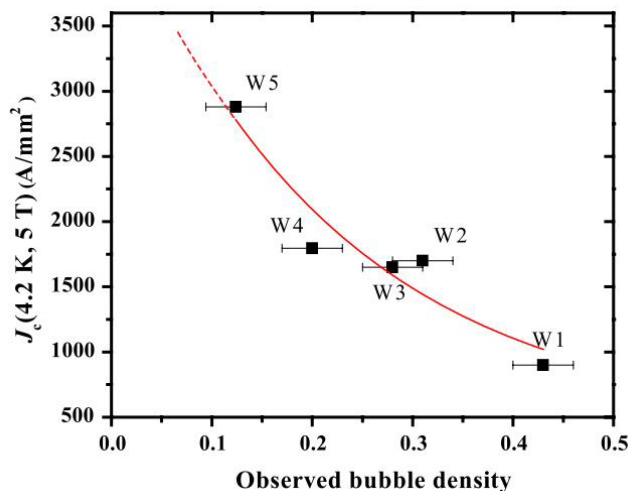


Рис. 2. Зависимость критической плотности тока образцов от пористости.

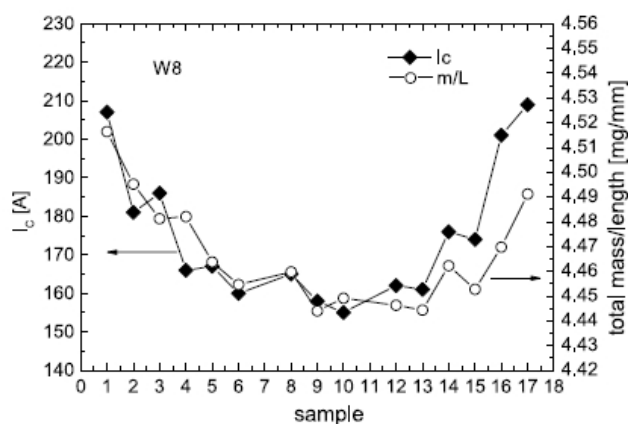


Рис. 3. Сравнение плотности и критического тока для 17 коротких образцов.

Для того чтобы выяснить, каким именно образом происходит снижение критических характеристик в длинномерных образцах, ученые провели еще одно исследование. Образец длиной около 1 м после термообработки был разрезан на 17 коротких образцов длиной 5 см, для каждого из которых измерялась критическая плотность тока и масса. В ходе экспериментов было обнаружено сильное снижение плотности критического тока с расстоянием от концов провода. Критический ток, измеренный для центрального образца, на 25% меньше критического тока крайних образцов. Более того, критический ток и масса образца оказались сильно коррелированными. Изменение массы провода на 2,5% приводит к изменению критического тока на 25%. Результаты измерений критического тока и массы, представлены на рис. 3. Изменения плотности проводника происходят на длине порядка сантиметра, что намного больше диаметра жилы (15 мкм). Причиной изменения плотности является давление

внутреннего газа, из-за которого при термообработке возникают полости, почти полностью заполняющие диаметр жилы.

Ученые пришли к выводу, что снижение критических характеристик длинномерных проводников, в сравнении с короткими образцами, возникает из-за нарушения связности зерен Bi2212 внутри жил. Увеличение плотности материала перед термообработкой, контроль внутреннего давления во время термообработки и поиск других методов сокращения объема полостей – верный путь к увеличению критической плотности тока проводов Bi2212.

Н.С.Вохмянина

1. Superconductor Science and Technology, v.24, N7, 75009, 75016

ПОЗИЦИЯ

Профессор Венкат Сельваманикам о перспективах современной сверхпроводимости

В марте 2011 года Венкат Сельваманикам (Venkat Selvamanickam), профессор Хьюстонского Университета и главный консультант по технологиям компании Superpower, дал интервью американскому изданию Superconductor Week. Он рассказал о достижениях и дальнейших перспективах в области сверхпроводимости. В прошлом году Объединению Прикладных Исследований (Applied Research Hub), образованному с целью обеспечения сотрудничества между компаниями, занимающимися сверхпроводимостью, штатом Техас был присужден грант в размере 3,5 миллионов долларов. Профессор Сельваманикам убежден, что развитие технологий и реализация коммерческих устройств послужит источником финансирования дальнейших разработок.

За последние пять лет определились области исследований, в которых внедрение сверхпроводящих технологий можно осуществить в наиболее короткие сроки. К ним относятся: получение высоких магнитных полей, альтернативная энергетика, накопители энергии.

Большой потенциал ВТСП устройств профессор видит на рынке возобновляемой энергии, в частности привлекательно строительство ветрогенераторов на основе ВТСП мощностью свыше 10 МВт. Министерство энергетики США инвестирует разработки методов накопления солнечной и ветровой энергии. На данный момент не существует единой технологии накопления энергии в полном необходимом временном спектре, поэтому активно идут работы по созданию сверхпроводящих магнитных накопителей энергии (SMES).

Одной из наиболее перспективных сфер применения сверхпроводимости является разработка сверхпроводниковых ограничителей тока (COT). Министерство энергетики финансирует проект, связанный с объединением COT и трансформаторов. Та-

кое совмещение уже используемых коммерческих устройств с СОР, по мнению профессора, позволит многим компаниям избежать радикальных изменений в их деятельности, заполучив при этом преимущества сверхпроводящих устройств. Так, например, можно избавиться от трансформаторного масла и тем самым существенно повысить пожаробезопасность.

В течение трех-пяти лет ожидается распространение технологических методов, разработанных для получения сверхпроводников, на другие области производства. Технологию непрерывного химического осаждения из паровой фазы методом разложения металлоорганических соединений (МОСVD) планируется применять не только для сверхпроводников, но и для полупроводников.

Стоит отметить успехи, связанные с развитием ВТСП. Буквально за три года производство ВТСП лент вышло на тот уровень, когда изготавливаются километры конкурентоспособного проводника. Непрерывно идет выравнивание соотношения «цена-качество», однако профессор Сельваманикам считает, что потребуются некоторый технологический скачок, чтобы производство смогло достичь максимально возможных масштабов.

Большие надежды главный консультант по технологиям компании Superpower возлагает на провода второго поколения, основанные на YBCO, характеристики которых намного выше, чем у других сверхпроводящих материалов. Несмотря на значительные достижения в этой области, остается огромный потенциал для дальнейшего развития.

Не стоит забывать и о материалах на основе Bi-2212. Ведутся многообещающие работы, направленные на применение проводов круглого сечения на его основе при высоких магнитных полях и низких температурах. Планируется также исследовать и улучшать характеристики проводников на основе MgB₂ при 30 К, 40 К и 4,2 Тл.

Н.С.Вохмянина

1. Superconductor Week 2011, v.25, N3

Пол Чу: проблемы развития теории ВТСП и поиск новых сверхпроводящих материалов

Весной 2011 года американский физик, профессор Хьюстонского университета, Пол Чу (Paul Chu), известный за открытие в 1987 году соединения YBa₂Cu₃O₇, переходящего в сверхпроводящее состояние при температуре 93 К, дал интервью издательству Superconductor Week. Он изложил свои взгляды на проблемы развития теории высокотемпературной сверхпроводимости и поиска новых сверхпроводящих материалов.

На данном этапе научного развития нет микроскопической теории, объясняющей все явления, происходящие в ВТСП материалах, и тот, кому удастся ее придумать, может претендовать на Нобелевскую

премию. Пол Чу выделил два направления исследований, направленных на выяснение механизмов, лежащих в основе ВТСП. Одно связано с изучением появляющегося в этом типе материалов магнетизма, а другое с развитием теории фонон-фононного взаимодействия. Профессор уверен, что оба эти направления важны, и, когда будет разработана теория высокотемпературной сверхпроводимости, и тот, и другой механизмы будут играть в ней определенную роль.

Большинство людей считает, что развитие научного понимания высокотемпературной сверхпроводимости идет достаточно медленно, ведь прошло уже 25 лет с момента ее открытия. Однако если вернуться к истории, то увидим, что на разработку микроскопической теории обычной сверхпроводимости потребовалось 46 лет после ее открытия в 1911 году Камерлингом Оннесом. Поэтому, несмотря на то, что ожидания ученых на более быстрое развитие теории ВТСП не оправдались, процесс познания этой области нельзя считать затянувшимся.

Сам Пол Чу в настоящее время работает над усовершенствованием уже известных ВТСП материалов. Подобные исследования послужили в свое время основой для открытия YBCO – соединения, на данный момент наиболее подходящего для практических применений. В то же время профессор уделяет много внимания поиску новых сверхпроводников с более высокими критическими параметрами. Он интригующе отметил, что придумал некоторый способ повышения критической температуры, но его действенность необходимо проверить. Также профессор занимается исследованием материалов, в том числе так называемых мультиферроидных, не являющихся сверхпроводниками.

Профессор считает, что отсутствие полной теории, объясняющей ВТСП, не является основной преградой для поиска новых ВТСП материалов. Понятие «высокая температура» - относительное. Разные периоды времени характеризуются своей «высокой» температурой перехода в сверхпроводящее состояние. И каждый раз, когда находили сверхпроводник с критической температурой выше, чем существующая, теория оказывалась бессильной, в том числе и БКШ. Для успешного поиска новых материалов необходим эмпирический подход, а исследователи должны обладать интуицией, большим опытом и широким кругом знаний в различных областях науки.

Пол Чу отметил, что верит в существование сверхпроводимости при комнатной температуре. Ведь ни экспериментальные результаты, ни теоретические разработки не дают повода утверждать обратное. Но когда, где и кем она будет обнаружена – никому не известно. Сверхпроводимость при комнатной температуре имеет колоссальный потенциал, поэтому имеет смысл уделять внимание исследованиям в этой области. Офис Научных Исследований

ВВС США (Air Force Office of Scientific Research), возглавляемый Гарольдом Вейнстоком, оказывает значительную поддержку этому типу исследований. Группа, с которой работает Пол Чу, является одной из тех, которые поддерживает AFOSR, и профессор уверен, что даже, если никто из них не откроет сверхпроводимость при комнатной температуре, в процесс ее поиска будут сделаны многие другие полезные открытия. Возможно, это будут материалы, имеющие научную ценность или полезные для применений в других областях науки.

Пол Чу отметил два предпочтительных для него сверхпроводника. Один из них YBCO, который до сих пор – материал, наиболее подходящий для практических применений и имеющий большой критический ток, не говоря о том, что был открыт

группой профессора. Другой сверхпроводник – Hg-1123. Существующий рекорд критической температуры принадлежит ему. Приложение давления позволило увеличить его критическую температуру с 134 К до 164 К. Такое поведение не наблюдалось до открытия этого сверхпроводника и не может быть объяснено ни одной моделью, предложенной для описания ВТСП. Основываясь на текущих результатах, профессор верит, что эта температура может быть еще увеличена и рекорд в 164 К будет побит.

Н.С.Вохмянина

1. Superconductor Week – 17 Апреля 2011.

**Издатель НИЦ «Курчатовский Институт»,
НБИК, НТК «Прикладная сверхпроводимость»**

Научный редактор: *В.С. Круглов*, зам. директора НТК сверхпроводимость

Редакторы: директор научного направления ОАО «ВНИИКП» *В.С. Высоцкий* vysotsky@gmail.com,

В.И. Щербаков sherby@issph.kiae.ru

В подготовке выпуска принимали участие: *Н.С.Вохмянина*, *С.В.Самойленков*,

А.К. Чернышева perst@issph.kiae.ru,

Верстка: *И.Л. Фурлетова*