

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19 12 октября 1989 г.

05.4; 12

КОМПОЗИТНЫЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ПРОВОДА,  
ПОЛУЧЕННЫЕ СКОРОСТНЫМ ЛУЖЕНИЕМ  
В МЕТАЛЛОКСИДНОЙ СИСТЕМЕ  $Bi-Sr-Ca-Cu-O$

А.Д. Грозав, Л.А. Конопко,  
Н.И. Лепорда

Использование хрупких сверхпроводников в той или иной комбинации с металлами и/или резистивными сплавами во многих случаях позволяет получить достаточный для их практического применения набор электрических, механических и тепловых свойств [1]. В этой связи актуальной является задача изготовления таких композитных материалов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Мы предприняли попытку получения тонких плотных покрытий из плавленной керамики  $Bi-Sr-Ca-Cu-O$  на однокомпонентных и многокомпонентных металлических подложках с температурой плавления выше 1000 °С. Все оказавшиеся доступными металлы и сплавы вступают в очень активное химическое взаимодействие с расплавленной керамикой. Это обстоятельство потребовало поиска путей ослабления указанного взаимодействия, которое катастрофически сказывается на физико-механических свойствах контактирующих материалов. Одним из таких путей по аналогии с технологией плоских ВТСП-пленок [2, 3] может быть создание тонких буферных слоев. Другой, менее трудоемкий, состоит в значительном уменьшении времени прямого контакта жидкой керамической и твердой металлической фаз. Последнее может быть достигнуто при скоростной протяжке гибких подложек через небольшую ванну с металлооксидным расплавом с последующей высокотемпературной (~ 800–840 °С [4]) кратковременной термообработкой всех составляющих

© Издательство „Наука“, „Письма в Журнал технической физики“, 1989 г.

получаемого композита в твердом состоянии. Благоприятная (с точки зрения исключения загрязнения инородными по отношению к элементному составу ВТСП-материалов примесями) ситуация для проверки высказанного соображения складывается при использовании медных проволок и лент. К тому же медь традиционно является самым распространенным нормальным металлом в технологии сверхпроводящих композитов [5].

Исходными материалами служили керамические образцы состава  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ , полученные обычным твердофазным взаимодействием с последующим спеканием, и промышленные неизолированные медные проволоки с диаметром  $d$  от 100 до 400 мкм и длиной 0.5–1.0 м. Проволоку, перемещающуюся с фиксированной линейной скоростью 5–150 мм/с, погружали в металлоксидный расплав с  $T \approx 900\text{--}1000^\circ\text{C}$ . Поскольку при высоких температурах предел прочности меди на растяжение очень мал ( $5 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup> при  $1000^\circ\text{C}$ ), натяжение проволоки должно быть по возможности минимальным и исключать какие-либо ударные нагрузки. В частности, с целью уменьшения сопротивления движения проволоки размер зоны расплава в направлении протяжки не превышал 4–6 мм. Максимальная скорость протяжки через зону, при которой еще удавалось нанести сплошную оболочку, соответствовала времени непосредственного контактирования поверхности проволоки с жидким расплавом менее 0.1 с. Толщину покрытия можно было регулировать изменением скорости протяжки, вязкости расплава, а также числом проходов через зону. Интервал изменения вязкости расплава и наименьший диаметр протягиваемой проволоки в конечном итоге ограничены сравнительно малой разницей между температурой плавления меди ( $1085^\circ\text{C}$ ) и температурой плавления висмутовой керамики ( $\approx 880^\circ\text{C}$ ). Использование медных проводников с  $d < 100$  мкм резко увеличивало обрывность процесса нанесения покрытий. Для проволок диаметром более 400 мкм сказывается передача тепла из зоны проходящему медному проводнику, в результате чего вязкость расплава в прилегающих к металлу слоях заметно увеличивается. Это приводит к тому, что цилиндричность и равномерность толщины оболочки по длине провода проявляют чувствительность даже к незначительным колебаниям температуры зоны и скорости протяжки.

Опытная реализация метода с помощью простых технических средств позволила изготовить внешне однородные цилиндрические оболочки черного цвета с достаточно равномерной радиальной толщиной  $h \approx 5\text{--}100$  мкм. Провода с отношением  $h/d \leq 0.1$  (рис. 1) выдерживают изгиб без трещинообразования на каркасе радиуса 15 мм. Наименьшей гибкостью обладают провода с неравномерной по толщине оболочкой, которая при изгибе растрескивается, а отдельные участки покрытия могут отслаиваться. Свободная от оболочки жила покрыта тонким красным слоем окиси меди.

Электросопротивление  $R$  и особенно структура поверхности сложным образом зависят от параметров режима нанесения. Имеющиеся пока данные не дают возможности четко выявить эти зависимости,

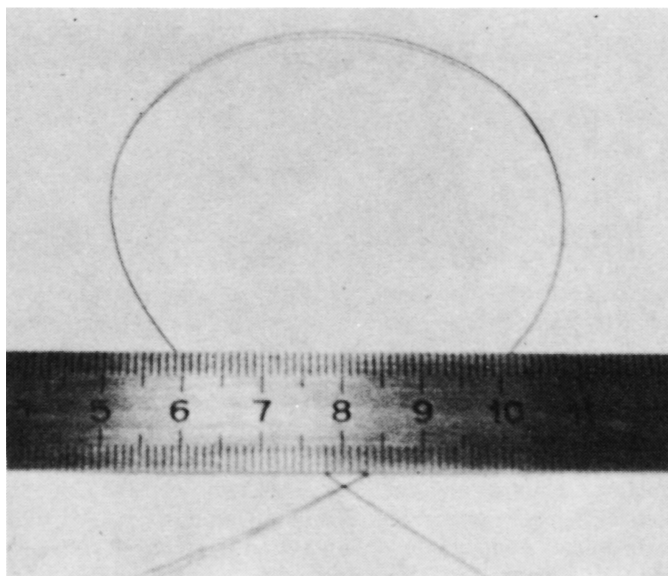


Рис. 1. Фотография композитного провода с висмутосодержащим металлооксидным покрытием толщиной  $\approx 10$  мкм и диаметром медной сердцевины  $\approx 220$  мкм.

однако были замечены некоторые закономерности. Измерения сопротивления проведены на постоянном токе (10 мкА) по четырехконтактной схеме. Контакты из серебряной пасты наносились на внешнюю поверхность провода. Анализ поверхности проводился в оптическом и растровом электронном микроскопах.

Поверхности тонких оболочек ( $\delta < 10$  мкм), полученных при больших скоростях охлаждения, являются зеркально-гладкими с отдельными вкраплениями кристаллитов в аморфноподобной фазе. С уменьшением скорости закалки количество и размер вкраплений растут, и оболочка приобретает мелкокристаллитную структуру с иглообразными включениями. Покрытия имеют высокие (характерные для образцов  $BiSrCaCu_2O_x$ , полученных методом закалки из расплава [6]) удельные сопротивления с полупроводниковой зависимостью от температуры.

При скоростях протяжки близких к 100 мм/с поверхность имеет, как правило, выраженную слоистую структуру из тонких пластинчатых монокристаллов, ориентированных вдоль или под небольшим углом к оси провода. Покрытия, полученные при пониженных скоростях кристаллизации из вязкого расплава, состоят из хаотически сросшихся ограненных кристаллических блоков различных размеров. Такие покрытия могут обладать как полупроводниковой, так и металлоподобной зависимостью  $R(T)$  без явных признаков существования резистивного сверхпроводящего перехода вплоть до 4.2 К.

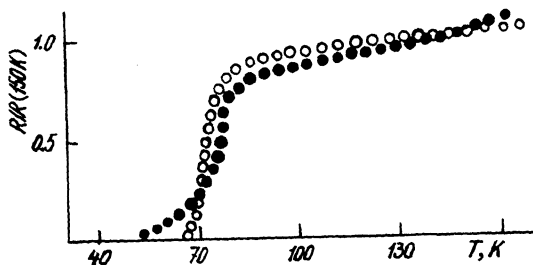


Рис. 2. Зависимости сопротивления от температуры для композитных проводов с покрытиями, полученными из шихтового состава  $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$  (1) и  $\text{Bi}_{1.5}\text{Pb}_{0.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (2). Толщина покрытий, мкм: 1 - 10, 2 - 25.

С целью восстановления сверхпроводящих свойств прямолинейные отрезки провода длиной  $\sim 50$  мм подвергались термообработке на воздухе при  $800^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. Зависимость  $R(T)$  для одного из отожженных образцов с  $h \approx 10$  мкм и  $d \approx 220$  мкм приведена на рис. 2 (кривая 1). Как следует из резистивных данных, сверхпроводящий переход одноступенчатый с низкотемпературным „хвостом“ и начинается при  $T_{CO} \approx 90$  К, а заканчивается при  $T_{CT} \approx 45$  К. Значения критических резистивных точек и поведение  $R(T)$  при  $T > T_{CO}$  практически не отличаются от полученных в [4] на стеклокерамических образцах  $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$ , приготовленных закалкой из расплава и затем отожженных при  $754^\circ\text{C}$ . Сходны в какой-то степени и вносимые термообработкой изменения в структуре поверхностей стеклокерамик и оболочек проводов. Можно предположить, что отжиг покрытий при  $700\text{--}800^\circ\text{C}$  приводит, как и в [4], к преимущественному образованию двух кристаллических фаз - несверхпроводящей с параметрами элементарной ячейки  $a = 5.39 \text{ \AA}$ ;  $c = 24.5 \text{ \AA}$  и сверхпроводящей с параметрами  $a = 5.41 \text{ \AA}$ ;  $c = 30.8 \text{ \AA}$  и  $T_c \approx 80$  К, - пространственная неоднородность которых обуславливает сильное размытие сверхпроводящего перехода. Вместе с тем, согласно [7], в системе  $\text{Bi-Sr-Ca-Cu-O}$  возможно существование сверхпроводящей фазы с  $T_c \approx 30\text{--}50$  К.

Изменение состава исходной керамики на  $\text{Bi}_{1.5}\text{Pb}_{0.5}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  позволило при тех же условиях получения и термообработки проводов ( $800^\circ\text{C}$ , 10 мин) увеличить  $T_{CT}$  до 65 К (рис. 2, кривая 2). Эти покрытия обладали при  $T = 61$  К критическим током  $\approx 4$  мА. Есть основания полагать, что оптимизация режима термообработки позволит значительно улучшить сверхпроводящие параметры проводов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Гуревич А.Вл., Минц Р.Г., Рахманов А.Л. Физика композитных сверхпроводников. М.: Наука, 1987. 240 с.
- [2] Nasu H., Myoren H., Ibara Y., Makida S., Nishiyama Y., Kato T.,

- I m u r a T., O s a k a Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 4. P. L634-L635.
- [3] V e n k a t e s a n T., C h a s e E.W., W u X.D., I h a m A., C h a n g C.C. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 3. P. 243-245.
- [4] K a n a i T., K u m a g a i T., S o e t a A., S u z u k i T., A i h a r a K., K a m o T., M a t s u d a S. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N. 8. P. L1435-L1438.
- [5] Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов / Под ред. Е.М. Савицкого, О. Хенкеля и Ю.В. Ефимова. М.: Металлургия, 1981. 480 с.
- [6] M i n a m i T., A k a m a t s u Y., T a t s u m i s a g o M., T o h g e N., K a w a r a Y. // Jap. J. Appl. Phys., 1988, V. 27. N 5. P. L777-L779.
- [7] Алексеевский Н.Е., Кузьмичева Г.М., Хлыбов Е.П., Митин А.В., Нижанковский В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 1. С. 45-47.

Поступило в Редакцию  
6 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19                      12 октября 1989 г.

06.3

### ОПТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ АРИФМЕТИЧЕСКОГО СЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СИМВОЛЬНОЙ ПОДСТАНОВКИ

Г.Г. Воеводкин, Е.М. Дианов,  
А.А. Кузнецов, С.М. Нефедов

Оптические вычислительные машины (ОВМ) будут обладать высоким быстродействием. Повышения быстродействия ОВМ (по сравнению с ЭВМ) планируется достигнуть в основном за счет параллелизма их работы. Одной из возможностей использования параллелизма в оптике является недавно предложенный метод вычислений на основе символьной подстановки (СП) [1]. Этот метод состоит из двух основных этапов. На первом происходит распознавание определенных картин на исходном изображении (матрице входных данных), а на втором — замена этих картин другими в соответствии с законом преобразования. Основное отличие метода от традиционной булевой алгебры, в которой происходит распознавание некоторой входной комбинации нулей и единиц и выдача одного сигнала на выходе (0 или 1), состоит в том, что происходит распознавание не только значе-