

05.4; 12

© 1991

# О ВЫРАЩИВАНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ РАСПЫЛЕНИЕМ ИОННЫМ ПУЧКОМ, ИЗВЛЕКАЕМЫМ ИЗ РАЗРЯДА С ХОЛОДНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

А.П. Семенов, Н.Н. Смирнягина,  
А.Ф. Белянин

Выращивание тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников распылением ионным пучком реализуется с помощью газоразрядных ионных источников [1]. Основным элементом конструкции ионного источника является катодный электрод. В зависимости от вида разряда электроны покидают катод благодаря термо- и ионно-электронной эмиссии [2-4], вследствие чего температура катода может быть высокой или низкой. Кроме того, в разряде катод подвергается интенсивному распылению ионами, ускоренными в катодном падении потенциала. Распыленные с катода атомы становятся в разряде ионами и засоряют ионный пучок, часть распыленных атомов легко проникает через одно или множество отверстий (в случае широкоапертурного ионного источника) отбора ионов и попадает сначала на мишень, затем на ростовую поверхность подложки и "заращивается" в пленку. Именно это обстоятельство вызывало сомнение в возможности выращивания распылением ионным пучком пленок с  $T_C$  не худшими, чем у керамических образцов. Проблему выращивания особо чистых тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников распылением ионным пучком можно разрешить, используя для распыления мишени разделенного по массам ионного пучка. С другой стороны, выращивание чистых пленок, очевидно, менее трудоемко и наиболее просто, если металл катодного электрода имеется в составе мишени. При использовании электродных схем с термокатодом такое соответствие встречается крайне редко ввиду короткого ряда металлов, пригодных для термоэмиссионных катодов. Ситуация упрощается для разрядных структур с холодным катодом. Здесь без особых технических затруднений катод можно изготовить, за малым исключением, практически из любого металла, даже из сверхпроводника, что открывает возможность расширения диапазона технологических режимов выращивания тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников.

В случае соединения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  целесообразно использовать медный катод, поскольку в пленках, выращенных распылением мишени  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ионным пучком, прослеживается недостаток меди [5].

Ниже представлены результаты исследований по выращиванию тонких пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , обладающих высокотемпературной

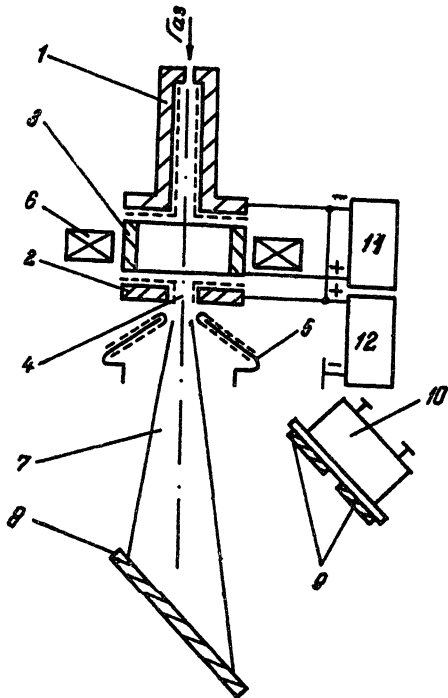


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 - полый катод, 2 - эмиттерный катод, 3 - анод, 4 - эмиссионное отверстие, 5 - извлекающий электрод, 6 - кольцевой магнит, 7 - пучок ионов, 8 - мишень, 9 - подложки, 10 - держатель подложек с нагревателем, 11, 12 - источники питания (— поверхность электродов, подвергнутая меднению).

сверхпроводимостью, распылением ионным пучком, извлекаемым из прикатодной плазмы разряда с полым катодом, зажигаемого в „медной“ разрядной камере. Выращивание пленок рассмотрено на примере ионного источника [2] по схеме [6].

Схема эксперимента приведена на рис. 1 и содержит полый (1) и эмиттерный (2) катоды, выполненные из магнитной стали. Между катодами установлен медный цилиндрический анод (3). В эмиттерном катоде выполнено соосное с апертурой полости эмиссионное отверстие (4), через которое из плазмы ведется отбор ионов полем ускоряющего электрода (5). Рабочие поверхности полого и эмиттерного катодов, стенки эмиссионного отверстия и отверстия в ускоряющем электроде закрыты медной фольгой. Целесообразность армирования стальных катодов медью, а не использование цельномедных катодов, обусловлена получением сильного 0.1 Тл магнитного поля и его продольного направления внутри полости анодного цилиндра и в промежутке ускорения, благодаря применению постоянного кольцевого магнита малой толщины с собственной индукцией 0.05 Тл.

$R$ , отн. ед.

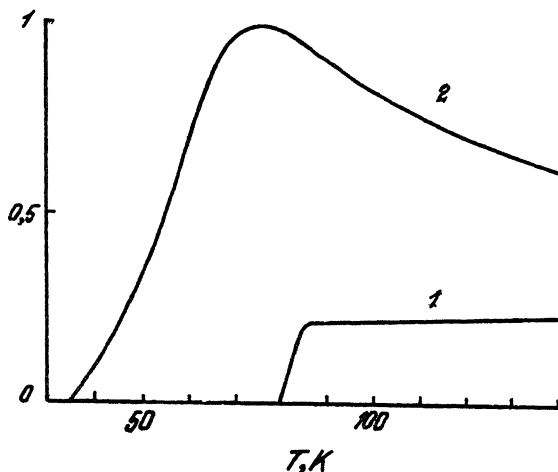


Рис. 2. Температурная зависимость электрического сопротивления пленок  $UBa_2Si_3O_{7-x}$ : 1 - медные электроды, 2 - стальные электроды.

Замена стальных катодом на медные менее предпочтительна. Так как стальные катоды, наряду с прямым назначением эмиттерного электрода, выполняют функцию, связанную с усилением магнитного поля благодаря замыканию силовых линий постоянного кольцевого магнита на межкатодный разрядный промежуток. Поэтому для разрядных структур с медными катодами эквивалентные значения индукции магнитного поля могут быть достигнуты применением кольцевых магнитов больших толщин и диаметров или объемных соленоидов. При малых размерах разрядной камеры конструкция ионного источника утрачивает свою компактность, становится металлоемкой и нерационально громоздкой. При этом возникают ограничения с использованием стержневых и полосковых магнитов. Эти недостатки легко преодолеваются при использовании составных катодов, в частности магнитная сталь - медная пленка. В этом случае магнитная цепь кольцевого магнита не разрушается.

Пучок ионов 7 аргона (ускоряющее напряжение 5 кВ) поступал наклонно на мишень 8 под углом  $45^\circ$ . В качестве мишени использован керамический диск диаметром 50 мм состава  $UBa_2Si_3O_{7-x}$ . Источник работал при давлении в вакуумной камере  $6.6 \cdot 10^{-3}$  Па. Пленки наращивали до толщин 1-3 мкм на подложки из  $MgO$  (100). Скорость роста пленок 0.15-0.2 нм/с. Ток ионного пучка 8-10 мА. Оптимизация температуры ростовой поверхности и режима отжига свежесаживаемых пленок проведены из данных анализа их фазового состава и кристаллического строения [7]. Однофазные

пленки выращены при температуре ростовой поверхности 543 К. Первая стадия отжига продолжительностью 1 ч проведена в токе кислорода при 1073 К, вторая при 673 К продолжительностью 4 ч с линейно регулируемым спадом температуры в диапазонах 1073-673 и 673-300 К.

На рис. 2 (1) представлена зависимость  $R(T)$  пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , наращенных на подложки из  $MgO$  (100). Металлическая проводимость, высокая крутизна зависимости  $R(T)$  ( $\Delta T_c \sim 5$  К), критические температуры  $T_c \sim 81-82$  К достигнуты благодаря применения медных катодов.

Замена „медных“ катодов на стальные при сохранении тех же технологических режимов роста и отжига способствовала изменению характера зависимости  $R(T)$  пленок (рис. 2(2)). Полная сверхпроводимость пленок наблюдается при температуре 35-40 К, начало перехода в сверхпроводящее состояние 75-78 К. Широкий интервал перехода ( $\Delta T_c = 40-45$  К), сдвиг его в область более низких температур (для мишени  $T_c = 92$  К), полупроводниковый характер проводимости связаны с действием внешнего фактора, засорения пленок железом [5]. По данным химического анализа содержание железа в пленках  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  составляет 0.47-0.68 мас. %.

Таким образом, модификация разрядной камеры для обеспечения конкретных технологических условий выращивания тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников свидетельствует, что среди известных принципиальных решений ионные источники, разрядные камеры которых не содержат термокатодов, могут дать в перспективе новые направления развития распылительной техники. Хотя выращенные тонкие пленки обладают высокими критическими параметрами, наполнение их медью все же оказывается неконтролируемым и требует больших экспериментальных усилий. Поэтому катоды было бы целесообразно изготовить из порошка высокотемпературного сверхпроводника, однако этот вопрос заслуживает отдельного обсуждения и постановки специальных экспериментов.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Семенов А.П. // ПТЭ. 1990. № 4. С. 26-42.
- [2] Семенов А.П. // ПТЭ. 1984. № 5. С. 23-24.
- [3] Shah S.I., Carcia P.F. // Materials. Lett. 1987. V. 6. N 3. P. 49-52.
- [4] Gao J., Zhang Y.Z., Zhao B.R., Out P., Yuan C.W., Li L. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 26. P. 2675-2676.
- [5] Семенов А.П., Белянин А.Ф., Смирнягина Н.Н., Евсеев В.З. // Техн. средств связи. Сер. ТПО. 1990. В. 3. С. 46-49.

[6] Семенов А.П. // ПТЭ. 1986. № 2. С. 220-221.

[7] Белянин А.Ф., Семенов А.П., Илюшечкин А.Ю., Смирнягина Н.Н., Евсеев В.З., Огурцов А.М. // Техн. средств связи. Сер. ТПО. В. 1. С. 4-15.

Поступило в Редакцию  
13 марта 1991 г.  
В окончательной редакции  
28 августа 1991 г.