

ПЛЕНКИ ВТСП-СОЕДИНЕНИЙ И СТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

И. С. Байков, А. И. Головашкин

Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации, Москва, Россия

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Дан краткий обзор основных методов получения качественных пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и условий достижения высоких критических параметров. Обсуждаются специальные пленки ВТСП-соединений, структуры на основе ВТСП-пленок и некоторые приложения.

ВВЕДЕНИЕ

Среди специалистов существует мнение, что первое реальное крупномасштабное применение ВТСП найдут в сверхпроводниковой электронике. Это означает, что одним из наиболее важных объектов исследования на сегодня являются ВТСП-пленки и структуры на их основе. За последние годы разработаны методы воспроизводимого получения ВТСП-пленок с уникальными характеристиками. Начаты исследования и осуществлены первые применения пленочных ВТСП-структур.

ВТСП-пленки необходимы как для физических исследований, имеющих целью выяснить непонятный до сегодняшнего дня механизм сверхпроводимости ВТСП, так и решения практических задач. Подавляющее большинство рекордных параметров достигнуто именно на ВТСП-пленках. Изучение таких важных для практики вопросов, как радиационная стойкость ВТСП, их стабильность, старение требует пленок. В виде пленок создаются также новые ВТСП-материалы.

В настоящее время имеется уже ряд приложений в области сверхпроводниковой электроники на основе ВТСП-пленок и различных пленочных структур (магнитометры, приемники излучений, элементы СВЧ-техники и т. д.). В сильноточковой сверхпроводниковой электротехнике активно использован ряд идей из пленочной технологии. В будущем просматриваются и новые, весьма перспективные приложения ВТСП-пленок, основанные на их необычных свойствах — лазерное воздействие на свойства пленок, фемтосекундный отклик, сверхтонкие (12—15 Å) пленки с огромным током, детекторы фононов и др.

В настоящей работе сделан краткий обзор методов получения качественных ВТСП-пленок, проанализированы условия достижения в них высоких критических параметров. Обсуждаются специальные пленки ВТСП-соединений, структуры на основе этих пленок и некоторые приложения.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВТСП-ПЛЕНОК

Ниже перечислены основные методы получения тонких ориентированных ВТСП-пленок, каждый из которых дает хорошие результаты:

- термическое испарение как обычное, так и "взрывное";
- молекулярно-лучевая эпитаксия (в наиболее совершенной форме — атомное, послонное осаждение);
- электронно-лучевое испарение;

ионное испарение;
лазерное испарение;
катодное распыление (на постоянном токе, радио- и низкочастотное);
магнетронное распыление (на постоянном токе и радиочастотное);
химические методы осаждения;
жидкофазная эпитаксия.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и успешно используется для получения различных ВТСП-пленок и структур на их основе. Наилучшие параметры достигаются у пленок, полученных лазерным или магнетронным распылением, а у структур — молекулярно-лучевой эпитаксией; в ряде случаев незаменимы химические методы и жидкофазная эпитаксия. Существует много вариантов вышеприведенных методов: с отжигом и “in situ” (без последующего отжига); с разным количеством мишеней (источников) и их составом; реактивное (в кислороде) испарение и различные методы окисления (например, в разряде); послойное и одновременное осаждение и т. д. Используются и комбинированные методы, дающие дополнительные преимущества за счет учета различия у исходных компонент упругости пара, коэффициентов прилипания и т. д. Разрабатываются и новые методы: кластерные, с ионизацией атомных пучков. Опубликован ряд обзоров, в которых рассматриваются методы получения ВТСП-пленок [1—3].

Лазерное испарение

Схема лазерного испарения достаточно проста: пучок излучения от лазерного источника через окно в вакуумной камере попадает на мишень. Испаряемое вещество (плазменный факел) достигает подложки и осаждается на нее. Мишень вращается, обеспечивая равномерность состава испаряемого материала. Испарение происходит в атмосфере аргона с примесью кислорода (для термализации испаряемых атомов и окисления пленки). Хорошие результаты получаются при лазерном испарении и в чистом кислороде при достаточно высоком его давлении (10^{-2} —1 торр). Для обеспечения плотности мощности на мишени в импульсе 10^8 — 10^{10} Вт/см² применяются лазеры с достаточно высокой энергией (0,1—1 Дж). Используются также лазеры АИГ:Nd³⁺ с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм (или 0,532 мкм), эксимерные лазеры с более короткими λ : XeCl ($\lambda = 308$ нм), KrF ($\lambda = 248$ нм), ArF ($\lambda = 193$ нм), а также лазер CO₂ с $\lambda = 10,6$ мкм.

Для улучшения качества напыляемых ВТСП-пленок и тонкой регулировки их состава используют двухпучковую установку с двумя лазерами и двумя мишенями. Кроме того, применяют экраны, закрывающие подложку от прямых пучков испаряемого вещества. Такой метод (“лазерное осаждение из газовой фазы”) эквивалентен химическому осаждению из газовой фазы, улучшает однородность пленки и исключает попадание на подложку капель и больших кластеров испаряемого вещества.

Оптимальный режим лазерного испарения — осаждение слоя толщиной 1—10 Å за один импульс; преимущество — перенос стехиометрии. Показано, что при лазерном испарении состав пленки практически не отличается от состава мишени в достаточно широком интервале мощностей лазерного излучения. Хорошие пленки можно сформировать за время от 30 с до нескольких минут.

Развиты методы получения сверхпроводящих пленок YBaCuO и BiSrCaCuO лазерной абляцией при атмосферном давлении в воздухе [4].

В работе [5] описан “in situ” метод послойного лазерного осаждения тонких ВТСП-пленок с контролем их формирования дифракцией быстрых электронов. Для оптимизации условий осаждения ВТСП-пленок анализируются параметры лазерной плазмы при испарении [6].

Магнетронное распыление

Используют магнетронное распыление на постоянном токе и радиочастотное (rf). Для создания магнитного поля, удерживающего плазму разряда вблизи мишени, используются CoSm, феррит Ba. При высоких мощностях проводят охлаждение мишени. Распыление проводят в Ag или смеси Ag : O при давлениях 10^{-2} — 10^{-1} торр. Разности потенциалов для появления разряда $U = 150$ — 200 В (иногда до 400 В) обеспечивают скорости осаждения пленок до $10 \text{ \AA}/\text{с}$. При радиочастотном распылении типичная мощность составляет 50 Вт. Радиочастотным методом удается получить пленку (распыляя мишень), состоящую из смеси окислов. Существуют многочисленные варианты этих методов, в том числе соиспарение компонент (Y, Ba, Cu) из трех магнетронов, испарение из двух мишеней ($\text{BaCO}_2 + \text{Y}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$) и др. В [7] рассматривается специальный магнетронный модуляционный метод, уменьшающий переиспарение пленки и позволяющий получать пленки, однородные на атомном уровне. Одно из преимуществ магнетронного метода — возможность получать образцы большой площади.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)

В типичной схеме, развитой для получения пленок YBaCuO, используются три источника — электронные пушки для Y и Cu и испарительная ячейка для Ba. Для увеличения длины пробега в камере создается достаточно хороший вакуум. В то же время кислород для окисления подводится непосредственно к подложке (схема с обдувом кислородом). В качестве источников используются и обычные термические нагреватели. С помощью индивидуального управления и измерения потоков от каждого источника удается тонко регулировать состав пленки. Типичные скорости осаждения $0,1$ — $1 \text{ \AA}/\text{с}$.

Специальный метод атомной послойной эпитаксии с контролем происходящей при осаждении реакции раскрыт в работах [8, 9]. Метод позволяет получать ВТСП-пленки и пленочные структуры с прекрасными свойствами и атомно гладкими плоскими поверхностями и интерфейсами. Фактически — это метод атомной инженерии, позволяющий, например, с помощью добавления или удаления определенных атомных слоев создавать новые “искусственные” ВТСП-соединения, а также многослойные структуры и сверхрешетки.

Химические методы осаждения

Существует ряд таких методов, преимущества которых заключаются в высоких скоростях осаждения, больших поверхностях подложек, возможности осаждения на поверхности сложной формы. Методы могут быть полностью безвакуумными и пригодны для получения как тонких, так и толстых покрытий.

Отметим три группы методов.

Первая группа — пиролиз нитратов (или других соединений) исходных металлов. Раствор нитратов в воде распыляется (пультверизация) и осаждается на подложку с температурой $T_D = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Пленка отжигается в течение 20 мин при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе. Для получения пленки необходимой толщины операция повторяется несколько раз. Затем проводится синтез соединения при $950 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 мин в кислороде. В работе [10] развит метод пиролиза 2-этилгексанатов Y, Ba и Cu.

Вторая группа — методы MOCVD (химическое осаждение из газовой фазы металлоорганических соединений). Применяются для получения пленок YBaCuO и BiSrCaCuO. В качестве органических соединений используются дикетонаты металлов с температурой испарения 100 — $200 \text{ }^\circ\text{C}$ или металлохелатов и другие металлоорганические соединения. Для получения пленок BiSrCaCuO применялся и

обычный CVD-метод (химическое осаждение из газовой фазы [11]). Причем в качестве химического соединения использовались галогениды металлов. Схема MOCVD включает в себя испарители соответствующих металлоорганических соединений, смеситель (для поступления потока кислорода) и реакционную камеру с нагреваемой подложкой. Величина $T_D \approx 750-800^\circ\text{C}$. Переносчиком органических соединений служит аргон, потоки которого регулируются. Метод позволяет получать однородные по толщине пленки большого диаметра [12].

Третья группа — термическое разложение вязких растворов. Применяются методы “погружения” подложки в раствор или цетрифугирования. После нанесения раствора на подложку проводится сушка при $100-400^\circ\text{C}$, затем синтез в кислороде при $800-900^\circ\text{C}$ и отжиг при 400°C . Далее процесс повторяется до необходимой толщины пленки. В качестве растворов используются алкоксиды металлов в этаноле, карбоксилаты металлов в хлороформе, соли уксусной кислоты (водный раствор) и др. В золь-гель-методе [13] осаждение компонентов проводится не из растворов, а из гелей.

Жидкофазная эпитаксия

На примере пленок BiSrCaCuO рассмотрен этот метод [14]. Раствор-расплав $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x + \text{“флюс” KCl (1 : 7)}$ выдерживается 4 ч при 1200°C , затем 2 ч при 1050°C . Подложка (MgO) помещается в расплав, проводится охлаждение до 1020°C со скоростью $1^\circ\text{C}/\text{мин}$. Затем она вместе с пленкой вынимается из расплава, проводится отжиг пленки в течение 1 ч при 850°C . Операция проводится при атмосферном давлении. Для пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ температура роста несколько ниже. Используются и другие флюсы [15].

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ ВТСП-ПЛЕНОК

Основная проблема — получить пленку стехиометрического (или заданного) состава с минимальным переходным слоем, что важно для всех методов и всех подложек, для многослойных структур, сверхрешеток и джозефсоновских переходов. Сложность задачи связана с высокой химической активностью ВТСП-соединений, их сложностью и высокой температурой их формирования (когда велика диффузия атомов в подложку и из подложки).

Важнейшие параметры и условия осаждения ВТСП-пленок: подложка, температуры осаждения T_D и отжига T_A , характер окисления, геометрия осаждения.

Подложки

ВТСП-пленки с хорошими параметрами получены на подложках SrTiO_3 , MgO , LaGaO_3 , NdGaO_3 , BaTiO_3 , $\text{ZrO}_2 (+\text{Y}_2\text{O}_3)$, Al_2O_3 (сапфир), LiNbO_3 , YAlO_3 , CaNdAlO_3 , гранатах. Лучшие пленки YBaCuO получают на монокристаллах (100) SrTiO_3 . Неплохие результаты достигнуты для подложек из BaF_2 , MgF_2 , SrF_2 , BaZrO_3 , Ba_2SiO_4 , LaAlO_3 , KTaO_3 . Предлагаются подложки SrLaAlO_4 и SrNdAlO_4 [16]. Важный параметр — рассогласование решеток подложки и пленки. Для орторомбического кристалла NdGaO_3 рассогласование составляет всего 0,4%. Специальная тема — металлические подложки. Используются подложки из Ni , Ag , Pt и нержавеющей стали. Для ряда диэлектрических подложек (сапфир, Si) применяются предварительно нанесенные тонкие (несколько сот ангстрем) слои (подслои). Хорошие результаты получены для подслоев ZrO_2 . С помощью “необычных” подслоев (CeO_2 , толщина 500 Å) удается получать ориентированные пленки BiSrCaCuO с наклонными “с”-осями [17].

Температура осаждения T_D

Повышение температуры подложки способствует увеличению подвижности атомов, составляющих пленку. Однако все ВТСП содержат активные элементы, и при высоких температурах реакция пленки с подложкой приводит к резкому ухудшению свойств пленки. В работе [18] показано, что при отжиге пленок $YBaCuO$ толщиной 0,5 мкм на подложках $ZrO_2 (+Y_2O_3)$ в течение 1 ч при 900 °С прореагировавшая область занимает порядка 1000 Å. Остальная часть пленки имеет стехиометрический состав и $T_c = 92$ К. В то же время аналогичные пленки на Si (с поверхностным слоем SiO) реагировали полностью и $T_c = 0$. В подложку уходил практически весь барий. Чем резче удастся сделать изменение состава на интерфейсе, тем лучше параметры пленок.

Оптимальная величина температуры подложки T_D для "in situ"-метода определяется необходимостью иметь высокую поверхностную и низкую объемную подвижность атомов. Для пленок $YBaCuO$ оптимальные температуры составляют 650—800 °С, минимальная $T_D = 400$ °С [19, 20]. Столь низкую температуру удалось достичь при лазерном испарении и дополнительной ионизации поступающего кислорода разрядом на постоянном токе. Для пленок $LaSrCuO$ минимальная температура отжига $T_A = 350$ °С (на воздухе). Такие температуры уже совместимы с полупроводниковой технологией.

Характер окисления

Процесс окисления — наиболее критическая фаза формирования пленки. Высокое давление кислорода вблизи пленки во многом гарантирует успех. Для уменьшения давления в остальной части камеры применяется метод обдува подложки кислородом.

Эффективные методы улучшения параметров ВТСП-пленок:

обеспечение точной стехиометрии (минимум паразитных фаз); если источник — мишень, то важен состав мишени (для $BiSrCaCuO$ удобны литые мишени);

уменьшение переиспарения пленки (специальная геометрия, термолизация испаряемых атомов, экранировка прямых пучков);

уменьшение взаимодействия между пленкой и подложкой (т. е. взаимодиффузии) (здесь применяются подслои, метод "in situ", уменьшение T_D , высокая скорость осаждения, уменьшение времени отжига — импульсный отжиг, обработка подложки и подслоя лазером, ионным пучком);

уменьшение переходного слоя (эпитаксия, уменьшение T_D);

согласование решеток подложки и пленки;

активизация процессов осаждения (плазмой разряда, ультрафиолетовым излучением (лампа), лазерным и электронным пучками, использованием озона вместо кислорода. Все это улучшает структуру пленки и повышает T_c).

Помимо оптимизации условий осаждения, применяются и другие приемы повышения T_c и улучшения характеристик пленок, например фторирование [21].

ПАРАМЕТРЫ ВТСП-ПЛЕНОК

В настоящее время разными методами получены ориентированные пленки всех ВТСП с толщиной от десятков ангстрем до 1 мкм, с разной ориентацией, на разных подложках, включая металлические (Ag, Ni и др.). Хорошо ориентированная (эпитаксиальная) пленка не имеет в рентгеновском спектре посторонних линий.

Для пленок типа "123" ($\text{M}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где $\text{M} = \text{Y}$, Ho , Eu и др.) сопротивление R линейно зависит от температуры, "остаточное" сопротивление равно нулю, отношение сопротивлений при 300 и 100 К равно $R_{300}/R_{100} \geq 3$, удельное сопротивление при 100 К в лучших пленках достигает 40—60 мкОм·см, наблюдается резкий переход в сверхпроводящее состояние ($\Delta T = 0,3\text{—}1,0$ К), величина $T_c = 91\text{—}92$ К. Столь же резкий переход по восприимчивости. Лучшие пленки (толщиной 2000 Å на подложке толщиной 1 мм) левитируют в магнитном поле 1 кЭ.

Критический ток I_c является мерой качества ВТСП-пленки и важнейшим прикладным параметром. Наибольшие значения I_c достигнуты в пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, причем в лучших пленках при $T = 4,2$ К $I_c = 3 \cdot 10^8$ А/см², а при $T = 77,3$ К $I_c = 1 \cdot 10^7$ А/см² (без внешнего магнитного поля). Даже на металлической подложке (Ni с подслоем $\text{ZrO}_2 : \text{Y}$) получен ток $I_c = 6 \cdot 10^5$ А/см² (77,3 К), что важно для приложений. В коротких пленочных мостиках удается приблизиться к току распаривания. Так, в работе [22] в мостиках YBaCuO длиной 500 Å наблюдался $I_c = 1,3 \cdot 10^9$ А/см², что указывает на возможность его дальнейшего повышения.

Магнитное поле относительно слабо влияет на критический ток эпитаксиальных ВТСП-пленок. В [23] показано, что для пленок YBaCuO с $I_c = 5 \cdot 10^7$ А/см² (4,2 К) поле $H = 8$ Тл, параллельное "с"-ориентированной пленке, уменьшало I_c всего на 10 %. Принципиальная возможность получения больших токов в высоких магнитных полях показана в работе [24]. В поле 27 Тл на эпитаксиальных пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, осажденных химическим методом, достигнут ток $I_c = 6,5 \cdot 10^4$ А/см² при 77 К.

Природа столь высоких I_c в ВТСП-пленках связана с очень высокой плотностью точечных дефектов. Ряд экспериментов указывает на важную роль поверхностных дефектов.

Величина верхнего критического магнитного поля H_{c2} в ВТСП-пленках исключительно велика. Для достаточно хороших пленок $\text{M}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ("123") величина $H_{c2}(0) = 110$ Тл для перпендикулярного поля H_{\perp} и 500 Тл — для поля, параллельного пленке H_{\parallel} . В работе [25] для пленок YBaCuO получено (экстраполяцией) даже более высокое значение $H_{c2}(0) = 910$ Тл (H_{\parallel}). Экспериментальное значение для пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ при $T = 77$ К $H_{c2} = 59$ Тл (H_{\parallel}) и превышает 110 Тл при низких температурах [26]. Заниженные значения связаны, в частности, с гидродинамическим течением вихрей.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ ВТСП-СОЕДИНЕНИЙ

Сверхтонкие пленки

Лазерным испарением в ФИ РАН получены пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной $d = 200$ Å с $T_c = 90$ К. В [27] изучена зависимость T_c пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ от их толщины. Пленки получены соиспарением электронным пучком Cu , Y , BaF_2 и отжигом в "мокром" кислороде на подложках SrTiO_3 , LaGaO_3 и KTaO_3 . Показано, что уменьшение T_c начинается при $d \approx 100$ Å. При минимальной толщине $d = 60$ Å на всех подложках $T_c \approx 70$ К. По сообщению Н. Rogalla (Университет Твенте, Нидерланды), пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной $d \approx 100$ Å на ZrO_2 имели $I_c = 7 \cdot 10^6$ А/см² при $T = 77$ К.

Авторы работы [28] изучили формирование сверхтонких пленок YBaCuO на MgO методом дифракции быстрых электронов. Показано, что параметр решетки слоя резко меняется в интервале толщин $d \approx 14\text{—}19$ Å от значения, соответствующего подложке (4,25 Å), до величины 3,9 Å, достигая при дальнейшем увеличении

толщины слоя постоянной решетки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Таким образом, пленка YBaCuO на подложке MgO формируется при $d \approx 15 \text{ \AA}$.

Ряд работ посвящен созданию сверхпроводящих пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ толщиной в одну постоянную решетки. Для таких ультратонких пленок чрезвычайно важно окружение: возникают механические напряжения, уходит кислород, при повышенных температурах происходит диффузия примесей. Изучена зависимость T_c пленок YBaCuO от толщины, причем эта пленка осаждалась на подслой $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ толщиной 1000 \AA и накрывалась слоем этого же соединения толщиной 200 \AA [29]. Такие пленочные структуры были получены разными методами на разных подложках и привели к однозначному выводу: сверхпроводимость появлялась при толщине слоя YBaCuO $d \leq 15 \text{ \AA}$, и T_c резко возрастала с ростом d , достигая уже для $d = 20 \text{ \AA}$ значения примерно 60 K .

В работе [30] сообщается о получении пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (между слоями PrBaCuO) с $d \approx 12 \text{ \AA}$ и $T_c = 50\text{--}55 \text{ K}$ ($T_{ce} \approx 30 \text{ K}$). При параллельном магнитном поле 10 Тл не менялось значение T_c . Авторы работы [31] сформировали пленку $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с $d \approx 12 \text{ \AA}$ между полупроводниковыми слоями $\text{Y}_{0,4}\text{Pr}_{0,6}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, имевшую $I_c = 2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ при $4,2 \text{ K}$. Все эти опыты подтверждают наличие квазидвумерной сверхпроводимости в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Показано, что с увеличением проводимости подслоя и верхнего слоя (например, допированием PrBaCuO кальцием) заметно повышаются T_c и резкость перехода ультратонкой ($11,7 \text{ \AA}$) пленки YBaCuO ($T_{ce} = 45 \text{ K}$, $T \geq 60 \text{ K}$).

Пленки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) толщиной в одну элементарную ячейку ($31,4 \text{ \AA}$) между слоями $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_x$ (Bi-2201) имели $T_{ce} = 65 \text{ K}$ и $T_c = 96 \text{ K}$, что превосходит критическую температуру массивного образца [32]. В работе [33] найдена сверхпроводимость пленки Bi-2212 (окруженной слоями Bi-2201) толщиной в половину элементарной ячейки ($15,4 \text{ \AA}$).

Пленки TlBaCaCuO

Рекордное значение T_c получено на пленках $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, осажденных диодным rf-распылением из двух мишеней со скоростью 80 \AA/мин . Пленки осаждались на подложки из MgO , вынесенные из зоны разряда, отжигались 20 мин при $895 \text{ }^\circ\text{C}$ и представляли собой текстуру с осью "с", перпендикулярной плоскости подложки; величина $T_{ce} = 122 \text{ K}$ ($R = 0$). В [35] получен ток $I_c 5 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$ при 77 K в пленках TlBaCaCuO . Пленки TlBaCaCuO с $T_{ce} = 95\text{--}111 \text{ K}$ получены самыми разными методами (достигнута даже $T_c \approx 30 \text{ K}$ методом жидкофазной эпитаксии "in situ" на MgO). Сопротивление пленок $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ линейно зависит от температуры, причем заметное отклонение от линейности (парапроводимость) начинается при $T = 145 \text{ K}$ [34].

Магнитные характеристики пленок TlBaCaCuO также достигают рекордных значений. Так, для монокристаллических пленок $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ величина $H_{c2}(0) \approx 10 \text{ МЭ}$. Гигантские поля нужны, чтобы разрушить сверхпроводимость таких пленок.

Отметим получение ВТСП-пленок $\text{Tl}_{0,5}\text{Pb}_{0,5}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ большой площади с очень низким поверхностным сопротивлением [36].

Пленки YBaCuO на Si и GaAs

Важным направлением деятельности являются совмещения сверхпроводимости с полупроводниковой технологией и создание гибридных устройств. Пленки на подложках Si получают разными методами, используя различные подслои, при этом величина $T_{ce} = 70\text{--}84 \text{ K}$.

В ФИ РАН методом двухпучкового лазерного осаждения "in situ" получены пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на Si (100) с подслоем ZrO_2 (толщина 200 Å) с параметрами: $T_c = 90$ К, $T_{ce} = 89$ К, отношение сопротивлений $R_{300}/R_{92} = 2,94$, линейная зависимость сопротивления от температуры $I_c \geq 10^6$ А/см² при 77,3 К. Применяются специальные меры для улучшения параметров пленок (гомоэпитаксация; рост T_D в течение осаждения; нанесение слоев Zr, Y толщиной 10—20 Å на Si в вакууме). Использование эксимерного лазера с длиной волны $\lambda = 308$ нм позволило получить пленки с $T_{ce} = 89,5$ К и $I_c = 3,5 \cdot 10^6$ А/см² при 77 К [37, 38].

Тонкие пленки YBaCuO (300—500 Å) на подслое YSZ при 77 К имеют $I_c = 2,2 \cdot 10^6$ А/см². Увеличение толщины пленки YBaCuO приводит к росту в ней напряжений и микротрещин из-за сильного различия коэффициентов теплового расширения самой пленки и Si. Поэтому используются и более сложные системы в качестве подслоев.

Пленки YBaCuO на Si без подслоя получают при низких $T_D \leq 550$ °С, однако T_{ce} не превышает 82 К. Сверхпроводящие пленки YBaCuO на GaAs (100) методом лазерной абляции в кислородной плазме ($\lambda = 246$ нм) получены в работе [39], $T_D = 600$ °С. Подслой $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ толщиной 100 Å необходим для предотвращения разложения GaAs.

ВТСП-пленки на металлических подложках

Просматривается перспектива создания длинномерных ВТСП-лент. Удаётся изготовить ВТСП-пленки с хорошими параметрами на подложках из Ni [40], Ag [41, 42], Pt и нержавеющей стали [49]. В работе [43] дано описание пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, приготовленных на подложках из специальных сплавов и нержавеющей стали с подслоем из TiN, согласующим разные коэффициенты теплового расширения ВТСП-пленки и подложки, а также "с"-ориентированных пленок с $T_D = 600$ °С с критическими I_c до 10^5 А/см² при 77 К, пригодных для ряда практических применений.

Пленки "новых" ВТСП

Каждый ВТСП-материал имеет свои преимущества. Пленки $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ ($x = 0,35—0,5$) — кубического безмедного изотропного ВТСП — высокого качества были получены молекулярно-лучевой эпитаксией, лазерной абляцией, rf-распылением. Для таких пленок, полученных с эксимерным лазером Krf, достигнута $T_c = 28$ К. Пленки BaKBiO за счет относительно большой длины когерентности (40—70 Å), значительной величины энергетической щели (3,6 мэВ), низкой температуры формирования ($T_D \leq 400$ °С "in situ") и других свойств перспективны для создания туннельных, джозефсоновских переходов и элементов сверхпроводниковой электроники. Получены пленки "электронного" ВТСП $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ с $T_c = 20$ К, а также сверхпроводящего фуллерита K_xC_{60} ($x = 3$) химическим осаждением, толщиной 960 Å, с отношением сопротивлений $R_{20}/R_{300} = 2$, $I_c = 40$ А/см² (4,2 К), $R_{20} = 10$ мОм·см. Величина $T_{co} = 18$ К — наивысшая для всех известных молекулярных и органических сверхпроводников.

Пленки $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CuO}_2$

Sr_xCuO_2 — новый ВТСП с максимальной $T_c = 110$ К. Получен при высоких (65 кбар) давлениях и температурах. Имеет наиболее простую структуру из всех купратных ВТСП: плоскости CuO_2 , разделенные плоскостями стронция. Добавка Ca стабилизирует структуру.

Методом послойной лазерной абляции получены пленки $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CuO}_2$ с признаками сверхпроводимости при $T > 100$ К. В работе [44] эти пленки ($x = 0,3$) приготовлены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (100) SrTiO_3 . Толщина пленок 300 Å. Обнаружен диамагнитный сигнал $\sim 1\%$ при $T = 155\text{--}170$ К. Сопротивление падает при этих же температурах (но не до нуля). Авторы считают, что их пленки содержат островки сверхпроводящей фазы с $T_c \approx 170$ К.

Небольшое падение сопротивления, возможно связанное с переходом малых объемов образца в сверхпроводящее состояние, наблюдалось в пленке Sr_xCuO_2 при $T = 185$ К [45]. Пленка получена обычным лазерным испарением при $T_D = 550$ °С.

Приведенные результаты не кажутся фантастическими, учитывая, что в системе HgBaCaCuO уже в нескольких лабораториях достигнуты (при давлении) $T_c = 150\text{--}160$ К [46]. Авторы этих работ считают, что давление можно заменить "химическим" сжатием. Подходящим методом создания таких систем является пленочная технология.

Пленки со сверхвысокими критическими токами

В [47] показано, что допирование пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ серебром заметно повышает их I_c . Пленки толщиной 1000—2000 Å получены лазерным испарением (эксимер KrF , $\lambda = 248$ нм) "in situ", $T_D = 700$ °С на подложках LaAlO_3 и SrTiO_3 . Максимальная плотность критического тока достигается при добавлении 5 вес. % Ag . При этом на (100) SrTiO_3 получена пленка с $I_c = 1,4 \cdot 10^7$ А/см² при $T = 77$ К. Показано, что структура пленки с Ag становится совершеннее, увеличивается размер зерна, зерна выравниваются, т. е. уменьшается мозаичность в плоскости "ab", уменьшается угол между зернами. Результат очень важен для практических приложений.

Пленки с $T_c = 250$ К

В работе [48] сообщается о возможной сверхпроводимости при $T = 250\text{--}280$ К. Пленки, а точнее пленочные искусственные купратные соединения, принадлежащие семейству Bi-Sr-Ca-Cu-O , были получены методом послойной (атомной) молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (100) SrTiO_3 . Дифракция быстрых электронов использовалась для контроля и управления формированием слоев. При этом толщина пленок составила 300 Å, температура осаждения $T_D = 500$ °С. Пленки содержали от трех до восьми плоскостей CuO_2 в каждом "элементарном" блоке. По утверждению авторов, признаки сверхпроводимости наблюдались в таких пленках при $T = 130\text{--}280$ К. Для пленок с восемью плоскостями CuO_2 в блоке сопротивление падало более чем на два порядка величины, $T_c = 250$ К. Диамагнитный (слабый) сигнал наблюдался при $T < 290$ К. Детальный состав и структура сверхпроводящей фазы неизвестны. Сопротивление пленки велико ($10^6\text{--}10^7$ Ом), критический ток чрезвычайно мал ($\leq 10^{-7}$ А), что может быть связано как с неоднородностью образца, так и малым количеством ВТСП-фазы. Необходимо тщательное исследование явления, т. к. проявление сверхпроводимости при таких температурах практически исключает фонный механизм и радикально меняет отношение к соответствующим моделям.

Коротко остановимся на создании ВТСП пленочных структур, по-существу, элементов для сверхпроводниковой электроники.

Требования к пленкам:

высокие T_c ;
резкий переход (кроме специальных случаев);
высокие значения I_c ;
гладкая поверхность;
стабильность (в том числе для пленок на Si);
хорошие (резкие) интерфейсы.

Туннельные и джозефсоновские пленочные структуры

Опубликовано довольно много работ по данной теме. В качестве барьеров используются как естественные диэлектрические окислы, так и окислы металлов. Перспективна структура $YBaCuO/PrBaCuO/YBaCuO$. Основные трудности — малость длины когерентности и наличие переходного слоя. Методом МЛЭ туннельные структуры из ВТСП получаются воспроизводимо [32]. Методом послойной МЛЭ получены также джозефсоновские переходы на основе $Bi-2212$ с уникально высоким значением характерного напряжения $U_c = 5-7$ мВ [48]. Такое напряжение соответствует частотам $(1,5-2) \cdot 10^{12}$ Гц что открывает новые перспективы в области высокочастотных приложений. Большое разнообразие созданных ВТСП джозефсоновских переходов (в том числе из “новых” ВТСП) [50] обещает несомненный прогресс в ВТСП приборостроения.

Гетероэпитаксиальные структуры

Приведем несколько примеров.

Пленка $YBaCuO$ на Si с подстройкой теплового расширения [51]: создана структура $YBaCuO/BaTiO_3/MgAlO_3/Si$. Эпитаксия: 1 : 1—1 : 2—3 : 2 (с верхнего слоя). Коэффициент термического расширения промежуточной системы является средним между коэффициентами Si и $YBaCuO$, приводит к стабилизации системы.

Система $NdCeCu/YBaCuO$, состоящая из 20 слоев, получена лазерной абляцией на $SrTiO_3$ [52]. Типичные толщины слоев $YBaCuO$ — 200 Å, $NdCeCuO$ — 400 Å. В системе происходят сжатие $NdCeCuO$ и растяжение $YBaCuO$, что приводит к увеличению криттока до $1,1 \cdot 10^7$ А/см² при 77 К.

Созданы структуры S—N—S-типа для электроники, например $YBa_2Cu_3O_7/Bi_2Sr_2CuO/YBa_2Cu_3O_7$.

Сверхрешетки

$YBaCuO/DyBaCuO$ на подложках $SrTiO_3$ и MgO получены dc-магнетронным распылением. Период составлял от 300 до 24 Å (в последнем случае 12 Å $YBaCuO$ + 12 Å $DyBaCuO$). Величины $T_{co} = 85-89$ К.

Ряд работ посвящен созданию сверхрешеток $YBaCuO/PrBaCuO$ (до 60 слоев), на основе хорошей согласованности постоянных решеток $YBaCuO$ и $PrBaCuO$. Толщина $YBaCuO$ 24 Å, толщина $PrBaCuO$ в разных образцах составляла 12—144 Å. Величина T_c уменьшается с ростом толщины $PrBaCuO$, что связывается с изменением концентрации носителей заряда в проводящих слоях CuO_2 .

В работе [53] рассмотрены сверхрешетки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6/\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, полученные методом послойной молекулярно-лучевой эпитаксии с разной толщиной слоев соединения Bi-2201 ($1-5 d_1$, где $d_1 = 12,3 \text{ \AA}$). Толщина слоев Bi-2212 $d_2 = 15,4 \text{ \AA}$ (величины d_1 и d_2 составляют половину параметра элементарной ячейки этих соединений). Обнаружено, что T_c таких сверхрешеток не зависела от толщины слоев Bi-2201. Даже для структур с отношением толщин составляющих слоев 5:1 T_c совпадала с T_c соединения Bi-2212 и была равна 80 К (величина T Bi-2201 равна 10 К). По мнению авторов, результаты прекрасно демонстрируют двумерность сверхпроводимости в ВТСП (в сверхрешетке с отношением толщин слоев 5:1 ВТСП-слой Bi-2212 разделены слоями несверхпроводящей при 80 К фазы Bi-2201 толщиной 61,5 \AA , огромной по атомным масштабам). Падение T_c в сверхрешетках других ВТСП связано с возникающими в системе напряжениями из-за недостаточно хорошего согласования кристаллических решеток компонент. Фактически созданные структуры являются искусственными ВТСП-соединениями [53].

Были построены сверхрешетки и из более сложных ВТСП-соединений.

Другие пленочные структуры

Существуют многочисленные работы по созданию (в основном с помощью литографии) ВТСП-микроструктур типа мостиков, многосвязных ВТСП-структур и т. д. На мостиках из ВТСП продемонстрированы все характерные особенности сверхпроводящих слабых связей (ступеньки Шапиро в СВЧ-поле, зависимость криточка от магнитного поля и т. д.).

НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ВТСП-ПЛЕНОК

Возможность устройств на основе ВТСП работать при азотных температурах придает им новое качество. Это связано с тем, что их рабочая температура перекрывается с диапазоном рабочих температур полупроводников. Таким образом, появилась возможность создания новой области техники — гибридной микроэлектроники ВТСП — полупроводники. Без ВТСП-устройств трудно представить будущее медицины, техники физического эксперимента, геофизики и других областей науки и техники.

Ниже приведены примеры некоторых устройств на основе ВТСП-пленок.

Болометр

Это чувствительный быстродействующий тепловой детектор; меандровая структура сделана фотолитографией на основе "с"-ориентированных пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на (100) MgO. Делается "растянутый" переход уменьшением содержания Cu в пленке на 10—20 %. Характерные времена отклика $\tau \leq 10 \text{ нс}$ [54].

СКВИДы, работающие при азотных температурах

Созданы оригинальные конструкции пленочных ВТСП — СКВИДов постоянного тока. Достигнута чувствительность к магнитному потоку $10^{-6} \cdot \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ при низких температурах (что совпадает с чувствительностью коммерческих СКВИДов из обычных сверхпроводников) и $10^{-4} \cdot \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ — при 77 К (Φ_0 — квант магнитного потока). Чувствительность к магнитному полю при 77 К выше $10^{-9} \text{ Э/}\sqrt{\text{Гц}}$ [55]. Энергетическое разрешение при 77 К достигает до 10^{-30} Дж/Гц . Низкое энергетическое разрешение таких СКВИДов позволяет не только регистрировать сверхмалые сигналы, но и оказывать исключительно малое обратное воздействие на объект

измерения, т. е. практически совершенно не искажать информацию, которую несет в себе исследуемый источник. Определенные успехи имеются и в создании μ f-СКВИДов. Наконец, формирование и устойчивая работа при азотной температуре ВТСП — СКВИДа и трансформатора потока на одном чипе [56] — крупнейшее достижение сверхпроводниковой электроники. ВТСП — СКВИДы, включая СКВИДы в интегральном исполнении, способны оказать серьезное влияние на развитие информационно-измерительной техники [57]. На их основе может быть создан ряд базовых микроэлектронных устройств нового поколения.

Сверхскоростные приемники

Быстрые (неболлометрические) ВТСП пленочные приемники, основанные на временах электрон-электронного рассеяния, демонстрируют отклик с временами $\tau = 10\text{—}30$ пс. Недавно обнаружен [58] необычно быстрый (сотни фемтосекунд) отклик (изменение коэффициента отражения R) ВТСП-пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на сверхкороткие лазерные импульсы длительностью 60 фс (1 фс = 10^{-15} с). При $T = 40$ К при лазерном импульсном освещении наблюдалось резкое уменьшение коэффициента отражения пленки $\Delta R/R \approx 4 \cdot 10^{-4}$ с характерным временем $\tau \approx 300$ фс с последующим восстановлением за время $\tau < 2$ пс. Обычный болометрический отклик, связанный с уходом фононов из пленки, имел времена на несколько порядков более длинные. Наблюдаемое явление открывает новые перспективы для создания сверхскоростных сверхпроводящих приемников излучения.

СВЧ-техника

Ряд приложений ВТСП-пленок в СВЧ-технике основан на том факте, что их поверхностное сопротивление R_s существенно ниже величины R_s меди. В работе [59] показано, что R_s пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной 0,3 мкм на подложках (100) LaAlO_3 ($T_c \geq 90$ К, $I_c = 5 \cdot 10^6$ А/см² при 77 К) уже на частотах $f = 100$ ГГц при $T = 77$ К в два раза меньше R_s меди. Для частот в несколько гигагерц отношение сопротивлений меди и YBaCuO превышает два порядка. При понижении температуры это отношение еще улучшается в пользу ВТСП.

Ниже перечислены созданные образцы пассивных СВЧ-устройств и элементов интегральных схем на основе ВТСП-пленок:

полосовые фильтры (компактность, перспективны для спутников; 30—40 фильтров окупают электронику);

линии задержки, микрополосковые линии связи (осуществлены линии пропускания с частотами до 10^{11} Гц);

фазовращатели (для фазированных антенн космических систем связи, других антенных решеток). Фирма TRW (США) создала ВТСП-линию передач с системой фазовращателей, содержащую более 2000 джозефсоновских переходов на краевой ступеньке на основе пленок YBaCuO [60];

миниатюрные антенны (с площадью в 100 раз меньше обычных; перспективны для самолетов, не обнаруживаемых радаром, из-за сильного уменьшения паразитного "свечения");

стабилизаторы генераторов, резонаторы;

ограничители сигналов (с уникально малыми временами до 10^{-11} с);

нелинейные элементы, смесители (с чрезвычайно большим динамическим диапазоном);

широкополосные СВЧ-детекторы на базе джозефсоновских переходов и др. Отметим также быстродействующие переключатели тока на основе пленок YBaCuO с временами переключения менее 250 пс [61] и даже 100 пс.

Необходимо решить еще ряд проблем для осуществления широкомасштабных приложений ВТСП-пленок в СВЧ-технике. В частности, необходимы стабильные пленки с хорошими характеристиками на сапфире.

В качестве примера использования ВТСП-пленок отметим проект ВМС США с использованием сверхпроводящих устройств в космосе [62]. В проекте стоимостью 1 млрд. дол. участвуют 22 фирмы. ВТСП-пленки предполагается использовать в качестве фильтров, линий задержки, стабилизаторов, генераторов и других элементов.

ВТСП-транзистор

В работах [63, 64] представлен трехэлектродный прибор с использованием ВТСП ВаКВiO: система $Au/Va_{1-x}K_xBiO_3/VrTiO_3; Nb$ (титанат стронция, допированный ниобием).

Межсоединения из ВТСП-пленок в гибридных ЭВМ нового поколения и цифровых устройствах

Используются микрополосковые линии, при этом уменьшаются потери, увеличивается скорость обработки информации, уплотняется упаковка элементов.

Основная проблема использования ВТСП-пленок в интегральных схемах — совмещение сверхпроводниковой и полупроводниковой технологий. Над этим работают крупные фирмы США и Японии.

Рассматриваются возможности принципиально новых применений эффектов, найденных для ВТСП-пленок:

фотоиндуцированные изменения транспортных свойств и T_c , фотоиндуцированная сверхпроводимость в $YBaCuO$ с дефицитом кислорода;

влияние электрического поля на T_c (изменение T_c на 10—30 К при напряженности поля вблизи поверхности 6 МВ/см).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы развит ряд эффективных методов получения ВТСП-пленок; ведутся интенсивные исследования их свойств. Получены качественные монокристаллические (эпитаксиальные) пленки разных ВТСП, достаточно хорошие пленки на полупроводниковых (Si) подложках.

Созданы первые пленочные структуры на основе ВТСП (элементы сверхпроводниковой электроники), первые пленочные ВТСП-устройства. Имеются перспективы достаточно широкого использования.

К нерешенным проблемам следует отнести:

стабильность, методы стабилизации, защита от воздействий; деградация свойств при формировании субмикронного рисунка, при пропускании тока [65, 66];

понижение температуры синтеза;

уменьшение механических напряжений;

сопряжение с полупроводниковой технологией;

создание однородных пленок большой площади.

Для создания коммерческих надежных приборов необходимо несколько лет.

Литература

1. Головашкин А. И. // ЖВХО. 1989. Т. 34. № 4. С. 481, 558.
2. Григорьев Г. Ю. // СФХТ. 1990. Т. 3. С. 1761.
3. Семенов А. П. // ПТЭ. 1993. № 2. С. 11.
4. Wild J. et al. // Physica C. 1993. V. 209. P. 486.
5. Gupta A. et al. // Physica C. 1993. V. 209. P. 175.
6. Предтеченский М. Р., Майоров А. П. // СФХТ. 1993. Т. 6. № 5. С. 1018.
7. Nakamura O. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 120.
8. Vozovic I. et al. Atomic Layer Engineering of Cuprate Superconductors: Preprint USA. 25 P. 1993.
9. Eckstein J. N. et al. // Thin Solid Films. 1992. V. 216. P. 8.
10. Nasu H. et al. // J. Mater. Sci. Lett. 1988. V. 7. P. 858.
11. Harsta A. et al. // J. Less Common Met. 1990. V. 164—165. P. 716.
12. Chern C. S. et al. // Supercond. Sci. Technol. 1993. V. 6. P. 460.
13. Zhuang H. et al. // Japan J. Appl. Phys. 1990. V. 29. P. 1107.
14. Shin J. S. et al. // Physica B. 1990. V. 165—166. P. 1501.
15. Takeya H. et al. // Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 229.
16. Новости ВТСП. 1993. Т. 6. Вып. 19/20. С. 3.
17. Tanimura J. et al. // Japan J. Appl. Phys. 1993. V. 32. P. 254.
18. Mogro-Campero A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. P. 584.
19. Watanachchi S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. P. 234.
20. High-T_c Update // 1988. V. 2. № 10. P. 8.
21. Pena O. et al. // Physica C. 1993. V. 206. P. 6.
22. Jiang H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 1785.
23. Roas B. et al. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 479.
24. Watanabe K. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 575.
25. High-T_c Update // 1992. № 19.
26. Golovashkin A. I. et al. // Physica C. 1991. V. 185—189. P. 1859.
27. Feenstra R. et al. // Physica C. 1989. V. 162—164. P. 655.
28. Terashima T. et al. // Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 987.
29. Chan I. N. et al. // Phys. Lett. 1993. V. 175. P. 241.
30. Cieplak M. Z. et al. // Physica C. 1993. V. 209. P. 31.
31. Kwon C. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 1289.
32. Vozovic I. et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1992. V. 275. P. 67.
33. Watanabe H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 246.
34. Lee W. Y. et al. // Physica C. 1989. V. 162—164. P. 639.
35. Venturini E. L. et al. // Physica C. 1989. V. 162—164. P. 673.
36. Lauder A. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. V. 3. P. 1683
37. Pechen E. V. et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. 3614.
38. Phys. Status Sol. // 1992. V. A131. P. 179.
39. Rao M. R. et al. // Appl. Phys. Lett., 1990. V. 56. P. 1905.
40. Katayama S., Sekine M. J. // Mater. Sci. 1992. V. 27. P. 4690.
41. Zhang J. M. et al. // Appl. Phys. Lett., 1990. V. 56. P. 976.
42. Tao W. et al. // Appl. Phys. Lett., 1993. V. 62. P. 894.
43. Kumar A., Narayan J. // Supercond. Sci. Technol. 1993. V. 6. P. 662.
44. Kanai M. et al. // Sci. and Technol. Japan, Jan. 1993. P. 28.
45. Norton D. P. et al. // Physica C. 1993. V. 217. P. 146.
46. Chu C. W. et al. // Nature. 1993. V. 365. P. 323.
47. Kumar D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 3522.
48. Lagues M. et al. // Science. 1993. V. 262. P. 1850.
49. Russo R. E. et al. // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. P. 1354.
50. Fink R. L. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 3360.
51. Wu X. D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 754.
52. Gross R. et al. // Appl. Phys. Lett., 1990. V. 57. P. 203.
53. Vozovic I. et al. // J. Supercond. 1992. V. 5. P. 19.
54. Бонч-Осмоловский М. М. и др. // СФХТ. 1989. Т. 2. № 9. С. 9.
55. Miklich A. H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 988.
56. Lee L. P. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 3051.
57. Полушкин В. Н. // СФХТ. 1993. Т. 6. № 5. С. 895.
58. Han S. G. et al. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 2708.
59. Inam A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. P. 1178.
60. Новости ВТСП. 1993. Т. 6. Вып. 17. С. 3.

61. *Frenkel A. et al.*//J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 3767.
62. SPIE. 1990. V. 1394. P. 104.
63. *Suzuki H. et al.*//Japan J. Appl. Phys. 1993. V. 32. P. 783.
64. IEEE Trans. Appl. Superc. 1993. V. 3. P. 2906.
65. *Головашкин А. И. и др.*//СФХТ. 1993. Т. 6. № 5. С. 1078.
66. *Mugno-Camporo A. et al.*//Physica C. 1993. V. 63. P. 246.

FILMS OF HIGH- T_c SUPERCONDUCTORS AND HETEROSTRUCTURES ON THEIR BASE

L. S. Baikov and A. I. Golovashkin

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

P. N. Lebedev, Institute of Physics RAS, Moscow, Russia

Short review of the basical preparation methods of the high-quality high- T_c superconducting thin films is given. Deposition conditions and obtained high critical parameters are discussed. Data for special high- T_c films, some film structures and applications are reported.