УДК 537.312.6

СВЕРХТОНКИЕ ВТСП-ПЛЕНКИ, ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И СВЕРХРЕШЕТКИ НА ИХ ОСНОВЕ

И. С. Байков
Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации, Москва, Россия

А. И. Головашкин
Физический институт им. П. Н. Лебедева, РАН, Москва, Россия

Обсуждаются методы формирования сверхтонких ВТСП-пленок и многослойных структур на их основе. Приведен краткий обзор результатов, полученных до последнего времени. Подчеркивается вывод о квазидвумерной сверхпроводимости купратных ВТСП.

Тонкие пленки находятся на переднем крае материаловедения и физики твердого тела и являются элементной физической базой микроэлектроники. Мировой рынок пленок для микроэлектроники в 1992 г. составил 840 млн. дол. По оценкам специалистов, к 2000 г. он увеличится до 1,6 млрд. дол., возрастая ежегодно более чем на 8 %. Бурно развивающееся производство многокристальных модулей, разработ-

ки новых устройств на основе гетероструктур и сверхрешеток непрерывно повышают спрос на пленки, в первую очередь, на тонкие. В последние годы о себе заявили тонкие сверхпроводниковые (СП) пленки, необычные свойства которых открывают им весьма перспективные применения во многих областях техники, включая аэрокосмическую и военную, а также медицину, геофизику, метрологию. В настоящее время появились опытные и даже коммерческие изделия, использующие такие пленки, в ближайшие годы следует ожидать значительное увеличение количества таких изделий. Сегодня СП-пленки применяются в ряде областей сверхпроводниковой электроники (магнетометры, приемники излучения, приборы СВЧ-техники и т. д.). Особый интерес представляют сверхтонкие пленки из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Такие пленки (толщиной менее 100 Å) являются сверхпроводящими при азотных температурах и способны пропускать огромные токи (более 10^6 А/см^2 при T = 77 K). Наиболее развита технология получения сверхтонких пленок $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO). Осаждение качественных пленок такого сложного состава представляет собой технологическую проблему.

СВЕРХТОНКИЕ ВТСП-ПЛЕНКИ

Большинство ВТСП-материалов имеет слоистую структуру с квазидвумерной проводимостью и сверхпроводимостью вдоль атомных слоев CuO_2 (в некоторых соединениях вдоль блоков из нескольких слоев CuO_2) и слабыми (джозефсоновскими) связями между слоями. Это значит, что в принципе могут быть созданы сверхпроводящие ультратонкие пленки толщиной в одну постоянную решетки с высокими критическими параметрами. Создание таких пленок является фундаментальной задачей как с точки зрения исследования физических процессов, происходящих в них, так и для приложений в микроэлектронике (микроминиатюризация). Над проблемой создания ультратонких ВТСП-пленок и исследованием их свойств работают специалисты ведущих стран мира.

Сверхтонкие ВТСП-пленки получают различными методами [1]. Однако наиболее подходящими оказались методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), импульсное лазерное испарение, магнетронное (катодное) распыление. Например, сверхтонкие ВТСП-пленки YBCO с высокими критическими параметрами и устойчивыми характеристиками такими методами получены на монокристаллических подложках $SrTiO_3$, $LaGaO_3$, $KTaO_3$. Удается осаждать такие пленки и на подложках с меньшим соответствием параметров решетки — MgO, ZrO_2, YSZ (окись циркония, стабилизированная иттрием). Идеальной подложкой для пленок YBCO является несверхпроводящее соединение $PrBa_2Cu_3O_7$ (PrBaCuO) с той же структурой, что и YBCO и очень близкими параметрами решетки. Наряду с традиционным магнетронным распылением применяются и его различные модификации — внеосевое осаждение и модуляционная методика [2], позволяющие получать атомногладкие ультратонкие ВТСП-пленки. Кроме вышеуказанных методов для получения тонких ВТСП-пленок YBCO, используется метод MOCVD [3] при достаточно низких (500 °C) температурах осаждения.

В последнее время в ряде лабораторий разработаны методы послойного (поатомного) выращивания пленок ВТСП-соединений [4—7]. Метод заключается в использовании молекулярно-лучевой эпитаксии с непрерывным контролем осаждаемого слоя. Формирование каждого атомного (молекулярного) слоя соединения контролируется методом дифракции быстрых электронов. Несомненно, успех метода основан на исходной слоистой структуре ВТСП-соединений.

В методе, приведенном в работах [4, 5, 7], создаются такие условия, при которых лишь верхний атомный слой растущей пленки вовлекается в процесс формиро-

вания химических связей. Таким образом, могут быть сформированы точные необходимые последовательности молекулярных (атомных) слоев — гетероструктуры, сверхрешетки и т. д. Оптимизация метода заключается в устранении взаимодиффузии различных слоев. Применяемые экспериментальные установки, например в [7], используют индивидуальные термические испарители для каждой катионной компоненты осаждаемой пленки, контролируемые с помощью ЭВМ экраны для каждого источника (которые определяют точное время осаждения каждого слоя), озоновые окислители с контролируемым потоком молекул, "in situ" контроль поверхностной структуры растущей пленки с помощью дифракции быстрых электронов и точный контроль величины атомных потоков от каждого источника. Обзор результатов, полученных методом атомной МЛЭ, представлен в работе [8]. Этот метод перенесен и на лазерное испарение [9, 10]. Существенно, чтобы скорости осаждения слоев при лазерном испарении были бы невелики. Такая технология является методом лазерной молекулярной (атомной) лучевой эпитаксии [10]. Из изложенного ясно, что точность контроля осаждаемой пленки должна быть на уровне регистрации одноатомного слоя.

Важной проблемой является уменьшение толщины осаждаемой ВТСП-пленки с минимальной деградацией критических параметров по сравнению с массивным материалом. Известно, что сверхпроводящие свойства пленки появляются в том случае, если ее толщина превышает определенную (критическую) величину, зависящую в первую очередь от материала подложки, а также других условий осаждения.

Согласование параметров решеток ВТСП-пленки и подложки — важнейший фактор при формировании первых слоев пленки и в значительной степени определяет указанную выше критическую толщину ВТСП-пленки. Рассогласование приводит к возникновению неоднородностей при формировании пленки, остаточным напряжениям на границе раздела пленка — подложка и даже микротрещинам. Важными условиями, влияющими на величину критической толщины пленки, являются также температура осаждения (и отжига) пленки и характер окисления. Оптимизация вышеуказанных условий осаждения имеет целью уменьшение взаимодействия пленки с подложкой (т. е. уменьшение взаимодиффузии атомов пленки и подложки и исключение возможных химических реакций) и тем самым минимизацию критической толщины.

Зависимость температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c пленок YBCO от их толщины изучена в работе [11]. Пленки осаждались на подложках $SrTiO_3$, $LaGaO_3$ и $KTaO_3$ методом соиспарения электронным пучком составляющих Cu, Y, Ba (последняя из мишени BaF_2). После осаждения проводится отжиг в "мокром" кислороде. Обнаружено, что для всех исследованных подложек уменьшение T_c пленок начинается при толщинах $d \approx 100$ Å. При минимальной толщине $d = 60$ Å достигнуты $T_c = 70$ K [11].

Несмотря на столь малую толщину, сверхтонкие YBCO пленки могут нести значительный ток без разрушения сверхпроводящего состояния. Так, в Университете Твенте (Нидерланды) в таких пленках толщиной $d = 100$ Å на подложках ZrO_2 достигнуты плотности критического тока $J_c = 7 \cdot 10^6$ А/см^2 при $T = 77$ K.

Формирование еще более тонких пленок YBCO на подложках MgO изучено в работе [12]. Анализ структуры образующихся ультратонких пленок проводился методом дифракции быстрых электронов. Обнаружено, что при толщинах менее одной постоянной решетки соединения YBCO вдоль оси "c" (11,7 Å) параметр решетки осаждаемой пленки в плоскости "ab" близок к параметру решетки MgO (4,25 Å). При толщинах пленки $d = 14$—19 Å параметр решетки резко меняется до величины 3,9 Å, достигая при дальнейшем увеличении толщины осаждамого слоя постоянной решетки YBCO в плоскости "ab". Таким образом, в работе [12] показано, что пленка YBCO со структурой массивного образца формируется при

$d \approx 15$ Å. Эксперименты показали, что сверхпроводимость ультратонких пленок YBCO на разных подложках и при разных методах их получения появлялась, когда толщина слоя превышала 10—20 Å.

При решении задачи формирования ВТСП-пленок толщиной в одну постоянную решетки сразу несколько групп обнаружили сверхпроводимость таких пленок из соединения YBCO с $T_c = 20$—30 K [13—16]. При формировании таких ультратонких пленок окружение играет решающую роль. Как правило, такие пленки формируются между двумя слоями с согласованными кристаллическими решетками. Оптимизация условий осаждения должна сводиться к минимизации механических напряжений, задержке ухода кислорода из пленки, уменьшению диффузии примесей в пленку. В качестве такого согласующего материала для ВТСП YBCO используют $PrBa_2Cu_3O_7$ с таким же типом решетки, как у YBCO, и очень близкими параметрами решетки. В работе [17] изучена зависимость T_c ВТСП-пленок YBCO с покрытиями из PrBaCuO от толщины. Пленки осаждались на подслой PrBaCuO толщиной 1000 Å и покрывались слоем этого же соединения толщиной 200 Å. Такие пленочные гетероструктуры были получены разными методами, на разных подложках. Их изучение привело к однозначному заключению, что сверхпроводимость появляется при толщине пленки YBCO $d \approx 15$ Å. Величина T_c резко возрастает с ростом d и уже при $d = 20$ Å достигает~60 K. Очень важно для приложений, что магнитное поле, параллельное поверхности ультратонкой пленки, величиной до 10 Тл практически не меняет T_c [16]. В работе [18] в качестве подслоя и защитного слоя было использовано полупроводниковое соединение $Y_{0,4}Pr_{0,6}Ba_2Cu_3O_{7-x}$ с более высокой проводимостью, чем у PrBaCuO. Это позволило сформировать пленку YBCO с толщиной $d = 12$ Å и критическим током $J_c = 2 \cdot 10^6$ А/см^2 при 4,2 K в магнитном поле 7 Тл. В более "толстых" пленках, толщиной в четыре элементарных ячейки ($d = 47$ Å), критический ток при 4,2 K составлял $1{,}5 \cdot 10^7$ А/см^2 (нулевое внешнее магнитное поле). Высокие значения критического тока говорят о хорошем качестве таких ультратонких пленок, в частности, об отсутствии слабых сверхпроводящих связей. В то же время это свидетельствует о высокой плотности центров пиннинга, присутствующих, по-видимому, в каждой элементарной ячейке.

В работе [19] показано, что увеличение проводимости подслоя и защитного слоя (например, допированием PrBaCuO кальцием) заметно повышает T_c и увеличивает резкость перехода в сверхпроводящее состояние ультратонкой (11,7 Å) пленки YBCO. При этом величина T_c в такой пленке толщиной в одну постоянную решетки может превышать 60 K, а нуль сопротивления достигается при $T = 45$ K.

Все эти опыты подтверждают наличие квазидвумерной сверхпроводимости в $YBa_2Cu_3O_7$.

Таким образом, критическая толщина появления сверхпроводимости ультратонкой пленки YBCO составляет около одной постоянной решетки (12 Å) при условии хорошего согласования типа и постоянных решеток пленка — подложка. При отсутствии согласования критическая толщина может возрасти в несколько раз. Теория предсказывает возможность двумерной сверхпроводимости образцов конечного размера, содержащих две плоскости CuO_2, связанные возможностью джозефсоновского туннелирования [20].

Еще более впечатляющие результаты получены для ультратонких пленок ВТСП-соединения $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ (Bi-2212). Как показано в [21], пленки Bi-2212 толщиной в одну элементарную ячейку (31,4 Å) между слоями $Bi_2Sr_2CuO_x$ (Bi-2201) имели значение $T_c = 96$ K, превосходящее критическую температуру массивного образца. Нулевое сопротивление таких пленок достигалось при $T = 65$ K. В работе [22] найдена сверхпроводимость пленки Bi-2212 (в окружении Bi-2201) толщиной всего в половину элементарной ячейки (15,4 Å). Пленки осаждались методом МЛЭ с озоновым окислением.

Важным моментом при осаждении тонких ВТСП-пленок является ранняя стадия их роста. Многие определяющие микроструктурные характеристики тонких пленок устанавливаются именно на первых стадиях их формирования. В дальнейшем эти характеристики сильно коррелируют со сверхпроводящими свойствами — критическим током, T_c. Исследованию первых стадий роста ВТСП-пленок посвящен ряд работ, например [23]. Обнаружено, что при импульсном лазерном испарении доминирует островковый механизм роста начальных слоев. Механизм формирования островков и их последующей коалесценции является довольно сложным. В процесс формирования первых слоев могут "вмешиваться" реакция их с материалом подложки и взаимодиффузия атомов пленки и подложки. Например, в работе [24] при изучении свойств пленок YBCO толщину в одну элементарную ячейку между слоями PrBaCuO показано, что диффузия Pr на места атомов Y может достигать 30 %. Это может быть одной из главных причин понижения T_c таких пленок по сравнению с критической температурой массивных образцов. Различные механизмы роста ВТСП-пленок на начальной стадии при лазерной молекулярной эпитаксии рассмотрены в работе [25]. Отметим, что во всех вышеприведенных примерах речь шла о так называемых "c"-ориентированных пленках, в которых слои расположены параллельно поверхности подложки, а ось "c" перпендикулярна ей. Предпочтительный рост "c"-ориентированных пленок связан с тем, что скорость роста в плоскости "ab" на порядок превышает скорость роста пленки вдоль оси "c" [26]. Механизм эпитаксиального роста пленок YBCO других ориентаций [(110) и (103)] на подложках (110) $SrTiO_3$ при лазерном испарении исследован в работе [27].

Ранние стадии роста и эволюция поверхностной микроструктуры "c"-эпитаксиальных пленок YBCO на подложках (100) MgO изучались в работе [28]. Пленки осаждались "in situ" методом магнетронного распыления на постоянном токе. Показано, что начальный рост пленок YBCO на подложках с несогласованным параметром решетки (какими являются подложки MgO) происходит с помощью образования трехмерных островков, при этом возникает довольно значительное количество винтовых дислокаций даже при умеренных температурах роста (720—760 °C), т. е. каждый островок растет как в высоту, так и в ширину, пристраивая атомы осаждающегося материала на свои спиральные ветви. Повышение температуры осаждения уменьшает плотность таких дислокаций. Следует отметить, что в [28] наблюдалась четкая корреляция плотности критического тока пленки с количеством таких дислокаций. В работе [29] с помощью электронно-микроскопических исследований установлено различие первых атомных слоев формирующейся пленки YBCO для подложек MgO и $SrTiO_3$. На подложке $SrTiO_3$ последовательность первых слоев обычно такова: BaO — CuO_2 — Y — CuO_2 — BaO — CuO. На MgO могут вначале появляться различные последовательности, однако уже в слое толщиной в одну элементарную ячейку это начальное хаотическое влияние подложки исчезает. Последним обычно является слой CuO для обеих подложек.

Интересен вопрос о механизме деградации сверхпроводимости при уменьшении толщины ВТСП-пленки. Известно [30], что в обычных низкотемпературных сверхпроводниках характер деградации сверхпроводящих свойств определяется морфологией ультратонкой пленки. Для случая однородных пленок, т. е. при наличии микроскопического или однородного беспорядка, с ростом величины сопротивления на квадрат $R_\square$ (которое и определяется толщиной пленки) уменьшаются критическая температура T_c и величина энергетической щели Δ_0. Эти характеристики уменьшаются монотонно и обращаются в нуль, когда наступает фазовый переход металл — диэлектрик. В случае макроскопического беспорядка (например, в гранулярных пленках) с ростом $R_\square$ происходят уширение резистивного перехода и

уменьшение критического тока, а величина Δ_0 остается примерно постоянной. Физической причиной изменения свойств ультратонких пленок из обычных сверхпроводников и фазового перехода металл — диэлектрик при уменьшении толщины считается изменение межэлектронного взаимодействия. В качественных (эпитаксиальных) ВТСП-пленках в силу их квазидвумерной проводимости потеря сверхпроводимости должна наступать резко при нарушении сплошности пленки. Наблюдающееся понижение T_c при уменьшении толщины реальных ультратонких ВТСП-пленок, возможно, связано с ростом числа дефектов (в первую очередь, с неоднородностью распределения кислорода), напряжениями, флуктуациями состава, возникающими слабыми связями (например, на границах зерен или двойниковых границах) и в конечном счете с уменьшением концентрации носителей заряда в плоскости CuO_2 (или блоке этих плоскостей). Дополнительно для очень тонких пленок могут иметь большое влияние на образование и сверхпроводимость первых слоев неоднородности поверхности подложки [17]. Физические свойства тонких пленок в сильной степени определяются их реальной структурой, поэтому важнейшей задачей является характеризация структуры таких пленок с максимально возможной точностью. Во многих случаях небольшие изменения структуры пленок на атомном уровне значительно влияют на их физические свойства, а значит, и на их использование в качестве элементов различных устройств [31].

Прямое отношение к вопросу о деградации сверхпроводимости при уменьшении толщины ВТСП-пленок имеют эксперименты, в которых изучаются флуктуации параметра порядка вблизи T_c. В работах [32] для пленок YBCO толщиной в одну постоянную решетки обнаружен переход Костерлица-Таулесса при T = 30 K. Наличие такого перехода — характерная особенность двумерной сверхпроводимости. Изучение характера флуктуаций параметра порядка в тонких пленках позволяет пролить свет на физику ВТСП. Отметим интерес к исследованию тонких пленок некупратных ВТСП — $Ba_{1-x}K_xBiO_3$, $Ba_{1-x}Rb_xBiO_3$ [33—35], который вызван перспективой их использования в туннельных и джозефсоновских переходах в связи со значительно большей величиной длины когерентности (40—70 Å), чем у купратных ВТСП.

СВЕРХРЕШЕТКИ

Помимо индивидуальных ВТСП-пленок ультрамалых толщин, много внимания уделяется созданию гетероструктур и особенно сверхрешеток на основе таких пленок. Хорошая согласованность решеток YBCO и PrBaCuO позволила создать сверхрешетки на их основе, состоящие из 60 периодов [13—15]. Толщина пленок YBCO в этих работах составляла либо одну постоянную решетки (12 Å), либо две (24 Å). Толщина прослойки из несверхпроводящего PrBaCuO варьировалась в разных образцах от 12 до 144 Å. Обнаружено уменьшение величины T_c с ростом толщины слоя PrBaCuO, что связывается с изменением концентрации носителей заряда в проводящих слоях CuO_2. Найдено [36], что в таких сверхрешетках анизотропия сильно увеличивается при увеличении толщины изолирующего слоя PrBaCaO с 12 до 24 Å. Для более толстых слоев PrBaCaO резистивный переход оказывается нечувствительным к параллельному пленкам магнитному полю в 9 Тл.

Температурная зависимость выше T_c для сверхрешетки YBCO/PrBaCuO с толщиной слоев 12 Å/12 Å хорошо аппроксимируется двумерной флуктуационной кривой [13]. Двумерный характер флуктуаций параметров порядка еще раз указывает на двумерную сверхпроводимость ВТСП.

Сверхструктуры из чередующихся слоев YBCO и $DyBa_2Cu_3O_7$ получены магнетронным распылением [13, 37]. Минимальный период составлял 24 Å

(12 Å YBCO + 12 Å $DyBa_2Cu_3O_7$). Переход в сверхпроводящее состояние начинался при T = 85—89 K.

Структурные рентгеновские исследования сверхрешетки YBCO/PrBaCuO и $YBCO/GdBa_2Cu_3O_7$ выполнены в работе [38]. Количественный анализ показал, что флуктуации толщины составляющих слоев, взаимодиффузия ионов Y и Pr, Y и Gd и напряжения играют важную роль и во многом определяют физические свойства результирующей ВТСП-структуры. В частности, показано, что параметр решетки вдоль "с"-оси слоев YBCO монотонно уменьшается с ростом толщины прослойки PrBaCuO (при одинаковой полной толщине сверхрешетки). Это уменьшение достигает 1 % при толщине прослойки PrBaCuO в восемь постоянных решетки.

В работе [39] получены сверхрешетки $Bi_2Sr_2CuO_6/Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ методом послойной МЛЭ с разной толщиной (12—60 Å) слоев сосинения $Bi_2Sr_2CuO_6$ (Bi-2201). Толщина слоев высокотемпературного сверхпроводящего элемента этой сверхрешетки $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi-2212) составляла 15,4 Å,т. е. половину параметра элементарной ячейки. Найдено, что T_c таких сверхрешеток не зависела от толщины слоев Bi-2201 вплоть до максимальных исследованных толщин 60 Å (2,5 постоянных решетки Bi-2201). Величина T_c = 80 K совпадала с критической температурой массивного соединения Bi-2212. Эти результаты прекрасно демонстрируют двумерность сверхпроводимости в Bi-2212. Авторы считают, что падение T_c в других сверхрешетках на основе ВТСП связано с возникающими в системе напряжениями из-за недостаточно хорошего согласования кристаллических решеток компонент.

Фактически созданные в работах [13, 37, 39] структуры можно назвать "искусственными ВТСП-соединениями". Таким образом, открывается возможность послойного выращивания новых ВТСП-соединений — сверхрешеток с необычными свойствами. Примером может служить "соединение" $Bi_2Sr_2Ca_{11}Cu_{12}O_x$, полученное в работе [21]. Такие материалы несомненно приведут к созданию на их основе принципиально новых приборов и устройств. Использование, например, в работе [40] искусственного соединения $Bi_2Sr_2Ca_7Cu_8O_x$ (допированного диспрозием) в качестве ультратонкого барьерного слоя в ВТСП джозефсоновском туннельном переходе позволило достигнуть рекордного значения характеристического напряжения U_c = 5—7 мВ. Это на порядок величины превышает значения, достигнутые ранее, и позволяет резко повысить рабочие частоты таких джозефсоновских элементов.

Были построены сверхрешетки и из более сложных соединений, например $Bi_2Sr_2(Ca_{0,85}Y_{0,15})Cu_2O_8/Bi_2Sr_2(Ca_{0,5}Y_{0,5})Cu_2O_8$ с отношением толщин компонент 30 Å:15 Å [41].

Ряд статей, посвященных ультратонким ВТСП-пленкам и сверхрешеткам на их основе, можно найти в недавно вышедших сборниках [42, 43].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая краткий обзор по формированию и исследованию свойств сверхтонких ВТСП-пленок, можно констатировать:

1. Развиты методы получения сверхтонких качественных ВТСП-пленок. Наиболее точные — послойная молекулярно-лучевая эпитаксия и лазерная МЛЭ с непрерывным контролем осаждаемых слоев — позволяют сформировать ВТСП-пленки толщиной в одну постоянную решетки.

2. Показано, что в купратных ВТСП осуществляется квазидвумерная сверхпроводимость: сверхпроводят пленки толщиной в одну и даже половину постоянной решетки.

3. Получены сверхрешетки на основе ультратонких ВТСП-пленок.

4. Методы послойной и лазерной МЛЭ начали успешно применяться для создания "искусственных" ВТСП-соединений.

5. Результаты работ по ультратонким ВТСП-пленкам открывают перспективы создания сверхпроводящих наноструктур для развивающейся кванторазмерной микроэлектроники.

Тонкие и ультратонкие ВТСП-пленки несомненно найдут применение уже в ближайшем будущем. Наиболее перспективными приложениями тонких ВТСП-пленок считаются межсоединения в гибридных ЭВМ нового поколения и цифровых устройств, сверхскоростные приемники, пассивные и активные элементы СВЧ-техники. Сверхтонкие ВТСП-пленки позволят в ближайшие несколько лет создать приборы и устройства с уникальными параметрами.

Литература

1. *Байков И. С., Головашкин А. И.* Прикладная физика. 1994. № 2. С. 3.
2. *Nakamura O.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60 (1). P. 120.
3. *Zama H.* et al. // Japan J. Appl. Phys. 1994. № 33. P. L 312.
4. *Eckstein J. N.* et al. // Thin Solid Films. 1992. V. 216. P. 8.
5. *Bozovic I.* et al. // Atomic Layer Engineering of Cuprate Superconductors: Preprint USA, 1993. — 25 P.
6. *Locquet J.-P., Machler E.* // MRS Bulletin. Sept. 1994. V. XIX. P. 39.
7. *Eckstein J. N.* et al. // Ibid. V. XIX. P. 44.
8. *Esktein J. N.* et al. // Ibid. August 1992. V. XVII. P. 27.
9. *Gupta A.* et al. // Physica C. 1993. V. 209. P. 175.
10. *Tabata H., Kawai T.* // Thin Solid Films. 1993. V. 225. P. 275.
11. *Feenstra R.* et al. // Physica C. 1989. V. 162—164. P. 655.
12. *Terashima T.* et al. // Japan J. Appl. Phys. 1989. V. 28. P. 987.
13. *Triscone J. M.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 804.
14. *Li Q.* et al. // Ibid. P. 3086.
15. *Lowndes D. H.* et al. // Ibid. V. 65. P. 1160.
16. *Terashima T.* et al. // Ibid. 1991. V. 67. P. 1362.
17. *Chan I. N.* et al. // Phys. Lett. 1993. V. 175. P. 241.
18. *Kwon C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 1289.
19. *Norton D. P., Lowndes D. H.* // Ibid. V. 63 (10). P. 1432.
20. *Bandte C.* // Appel·J. Physica B. 1994. V. 194—196. P. 1359.
21. *Bozovic I.* et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1992. V. 275. P. 67.
22. *Watanabe H.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 246.
23. *Alarco J. A.* et al. // J. Appl. Phys. 1994. V. 75. P. 3202.
24. *Schuller I. K., Bruynseraede Y.* // The Rigaku Journal. 1993. V. 10. P. 3.
25. *Frey T.* et al. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 3483.
26. *Roy R.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1994. V. 12 (2). P. 269.
27. *Rossel C.* et al. // Physica C. 1994. V. 223. P. 370.
28. *Savvides N., Katsaros A.* // Ibid. V. 226. P. 23.
29. *Dalton Y.* et al. // Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ. 1993. V. 70. P. 494.
30. *Valles J. M.* et al. // Physica B. 1994. V. 197. P. 522.
31. Physics, Fabrication and Application of Multilayered Structures. Ed. P. Dhez, C. Weisbuch. Plenum, N. Y., 1988.
32. *Matsuda Y.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. P. 3228; Phys. Rev. B. 1993. V. 48. P. 10498.
33. *Hellman E. S.* et al. Advances in Superconductivity IV, ed. H. Yayakawa, N. Koshizuka (Springer, Tokyo, 1992). P. 855.
34. *Abe H.* et al. // IEEE Electron Device Lett. (EDL). 1993. V. 14. P. 100.
35. *Ogihara M.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63 (19). P. 2694.
36. *Brunner O.* et al. // Helvetica Phys. Acta. 1990. V. 63. P. 803.
37. *Triscone J.-M.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. P. 1016.
38. *Fullerton E. E.* et al. // Ibid. 1992. V. 69. P. 2859.
39. *Bozovic I.* et al. // J. Superconductivity. 1992. V. 5. P. 19.
40. *Bozovic I.* et al. Superconducting Oxide Multilayers and Superlattices: physics, chemistry, and Nanoengineering. Physica C, 1995.
41. *Kanai M.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P.198.

42. Superconducting Superlattices and Multilayers. Ed. I. Bozovic. SPIE Proc. V. 2157. Los Angeles, 1994. — 386 p.

43. Oxide Superconductor Physics and Nanoengineering. Ed. D. Pavuna, I. Bozovic. SPIE Proc. V. 2158. Los Angeles, 1994. — 282 p.

Авторы благодарят И. Бозовика за предоставление результатов работы [40] до ее публикации.
Работа поддерживается Научным советом по ВТСП в рамках Государственной программы "Высокотемпературная сверхпроводимость".

ULTRATHIN FILMS OF HIGN-T_c SUPERCONDUCTORS, HETEROSTRUCTURES AND SUPERLATTICES ON THEIR BASE

I. S. Baikov
The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

A. I. Golovashkin
P. N. Lebedev Institute of Physics RAS, Moscow, Russia

We decribe a modern technology for preparation for HTSC ultrathin films and multilayered structures on their base. Up-to-date short review of experimental investigations is given. The present results show strong evidence for quasi-two dimensional nature of cuprate high-T_c superconductivity.