

## ВТСП-ПЛЕНКИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖКАХ И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

И. С. Байков, А. И. Головашкин

Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации

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

Рассмотрены методы осаждения ВТСП-пленок на полупроводниковых подложках, условия оптимизации параметров таких пленок и примеры устройств на их основе.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [1] выдвинуло проблему создания гибридных (сверхпроводник-полупроводник) электронных приборов, устройств, систем, работающих при температурах жидкого азота и использующих преимущества обоих типов материалов.

Решение этой задачи важно для разработки нового поколения цифровых приборов и ЭВМ, основанных на полупроводниковых интегральных схемах и требующих для дальнейшего развития понижения рабочих температур.

Первый крупный шаг на пути решения этой проблемы — получение пленок ВТСП-соединений с высокими критическими параметрами на полупроводниковых (прежде всего кремниевых) подложках. В настоящей работе рассматриваются методы осаждения ВТСП-пленок на полупроводниковых подложках и приводятся примеры устройств, основанных на таких пленках.

Развиваются разные методы осаждения ВТСП-пленок на кремниевые подложки: лазерное испарение [2], высокочастотное магнетронное [3, 4] и катодное [5] распыление, термическое соиспарение компонент из нескольких источников [6], магнетронное распыление на постоянном токе [7], МOCVD [8], молекулярно-лучевая эпитаксия [9]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Краткий обзор различных методов получения ВТСП-пленок дан в работе [10].

Первые ВТСП-пленки на кремниевых подложках были получены еще в 1988 г. [11—13]. Обзор первых работ по осаждению качественных ВТСП-пленок на Si выполнен в [14]. Отмечена высокая химическая активность ВТСП-соединений, которая проявлялась в реакции элементов ВТСП-соединения с Si, в сильной взаимной диффузии элементов пленки в подложку и Si в пленку [15]. При высоких температурах (700—900 °С), необходимых для стандартных методов формирования ВТСП-пленок, Si настолько активно реагирует с компонентами материала пленки, что это приводит к ее сильному загрязнению и катастрофическому ухудшению критических параметров.

Исследованию взаимодействия между пленкой и кремниевой подложкой посвящена работа [16], в которой изучались взаимная диффузия и реакция между пленкой  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и Si-подложкой методом спектроскопии обратного резерфордовского рассеяния. Температура отжига в кислородной атмосфере варьировалась в интервале 600—950 °С. Обнаружено, что из трех элементов Y, Ba и Cu последняя диффундирует в кремниевую подложку быстрее всего. Медные силициды обнаружены в приграничном слое.

При условиях осаждения, которые требуются для формирования качественных ВТСП-пленок (соответствующие температура подложки, скорость осаждения, плотность потока частиц), происходит активная реакция между соединением  $YBa_2Cu_3O_7$  и Si. Используют различные способы предотвращения такой реакции и взаимодиффузии элементов пленки и подложки. Для решения этой проблемы

наметилось два основных направления — применение защитных (буферных) подслоев и понижение температуры формирования пленок  $T_D$ .

Наиболее эффективным способом является предварительное нанесение на Si тонких защитных слоев различных материалов — подслоев [17]. Лучшие на сегодняшний день результаты на Si-подложках получены именно с применением подслоев. Такие защитные слои выполняют и другую важную функцию: вырастая эпитаксиально на Si, они позволяют получать и эпитаксиальные пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , которые обладают наилучшей совокупностью сверхпроводящих параметров. Типичная толщина подслоев — несколько десятков нанометров.

Успешно используется подслои из YSZ (окись циркония, стабилизированная иттрием) [5, 18, 19]. Авторы работы [18] получили пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  толщиной всего 30—50 нм на Si (100) с эпитаксиальным подслоем YSZ толщиной 50 нм. Как пленка, так и подслои получены “in situ” импульсным лазерным испарением. Величина критического тока таких пленок достигала при температуре 77 К значения  $2,2 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>, при  $T = 4,2$  К —  $2 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>;  $T_c = 86$ —88 К (температура, при которой сопротивление  $R = 0$ ). Удельное сопротивление при  $T = 300$  К составило 280 мкОм. Эти параметры близки к параметрам пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на диэлектрических кристаллических подложках.

Из других подслоев, успешно применяемых для Si-подложек, отметим чистый окисел циркония  $ZrO_2$  [2], а также  $HfO_2$  [13, 20],  $RuO_2$  [4],  $MgO$  и  $MgO/BaTiO_3$  [21],  $Y_2O_3/YSZ$  [3],  $Si_3N_4/SiO_2$  [22],  $NiSi_2/ZrO_2$  [23] и даже  $CeO_2$ . Из металлических подслоев на Si отметим аморфный сплав  $IrTa$  [23], на который при 650 °С удалось осадить пленку  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с  $T_c \approx 70$  К. В работе [6] пленки толщиной 2—10 нм с  $T_c = 78$  К получены на Si с подслоем  $SiO_2 + Y$ .

Используются и более сложные буферные слои на Si-подложках. В работе [24] эпитаксиальные ВТСП-пленки выращены на подслое  $BaTiO_3/MgAl_2O_4$ . Критическая плотность тока при 77 К достигала для таких пленок значений  $6 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Более сложные системы в качестве подслоев используются, в частности, в целях согласования сильного различия коэффициентов теплового расширения ВТСП-пленки и Si [19]. Используемая в работе [24] гетероэпитаксиальная структура  $BaTiO/MgAlO$  решает эту задачу тем, что ее коэффициент термического расширения является промежуточным между коэффициентами Si и  $YBaCuO$ . Это приводит к стабилизации всей системы.

Другим методом уменьшения взаимодействия ВТСП-пленки и Si-подложки является понижение температуры осаждения (отжига) пленки [7]. Оптимальные для других типов подложек температуры осаждения  $T_D = 700$ —900 °С совершенно не пригодны для полупроводников. В работе [25] показано, например, что при отжиге пленок  $YBaCuO$  толщиной 0,5 мкм на Si (с поверхностным слоем SiO) в течение 1 ч при 900 °С они реагировали полностью и их  $T_c = 0$ .

Для совместимости сверхпроводниковой технологии с технологией интегральных полупроводниковых микросхем температура осаждения ВТСП-пленок  $T_D$  должна быть понижена до 300—400 °С. Заметного понижения  $T_D$  при росте ВТСП-пленок можно достичь при активации процессов осаждения плазмой глеющего разряда, ультрафиолетовым или лазерным оптическим излучением [26—28]. По-видимому, при низкотемпературном осаждении ВТСП-пленок весьма существенна активная окислительная роль атомного кислорода [29].

Уменьшение температуры подложки при осаждении (или температуры отжига) можно достичь также за счет более высокой однородности состава, специальных методов окисления (подведение потока кислорода непосредственно к осаждаемой пленке, использование озона вместо кислорода, использование образующегося в разряде атомарного кислорода), повышенной скорости осаждения.

В тех случаях, когда повышение температуры осаждения не критично само по себе, уменьшить взаимодиффузию материалов ВТСП-пленки и подложки можно за счет сокращения времени осаждения, что достигается увеличением скорости осаждения [30].

Помимо вышеописанных основных методов защиты пленки от загрязнения материалом подложки, развит ряд специальных методик для улучшения параметров ВТСП-пленок на Si. Можно указать такой интересный прием, как гомоэпитаксия, при котором постепенно с ростом толщины улучшается структура пленки и повышаются ее критические параметры. Достигается гомоэпитаксия, например, с помощью роста температуры подложки в течение времени осаждения пленки [31]. Отметим также нанесение на подложку тонких защитных слоев чистых металлов (Zr, Y) толщиной 10—20 Å [31]. Такие слои, осаждаемые до подслоя, приводят к раскислению поверхности кремния и в конечном счете — к улучшению параметров ВТСП-пленки. Лучшие параметры пленок на Si получают при комбинации вышеперечисленных методов.

Наинишие, достигнутые на сегодняшний день температуры осаждения, при которых удается получать достаточно хорошие ВТСП-пленки на кремниевых подложках, равны: для пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  в методе "in situ"  $T_D = 400^\circ\text{C}$  [32], для пленок  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  —  $T_D = 350^\circ\text{C}$  (минимальная температура отжига) [33]. Для пленок  $\text{YBaCuO}$  достижение такой низкой температуры осаждения стало возможным при лазерном испарении с помощью дополнительной ионизации кислорода в разряде постоянного тока. Такие температуры уже совместимы с полупроводниковой технологией.

Пленки  $\text{YBaCuO}$  на Si без подслоя получают при относительно низких температурах осаждения  $T_D \leq 450\text{—}550^\circ\text{C}$ , однако величина  $T_{ce}$  не превышает 82 К [6, 7]. При этом полезна предварительная обработка подложки лазерным излучением, в этих целях (а также и для отжига ВТСП-пленки) в работе [34] применили  $\text{CO}_2$ -лазер.

В настоящее время в России методы осаждения ВТСП-пленок на кремниевые подложки активно развиваются в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (Москва) и в Институте прикладной физики (Нижний Новгород). В первом из них для получения ВТСП-пленок был развит метод двухпучкового лазерного испарения "in situ" [35]. (Безотжиговый "in situ" метод применяется в Лаборатории сверхпроводимости ФИ РАН для получения ВТСП-пленок с 1987 г. [36].) Для осаждения пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  на Si используются подложки (100) Si из монокристаллического кремния [31]. Применяются подслои из YSZ или  $\text{ZrO}_2$ , которые выращиваются на Si импульсным лазерным испарением (типичная толщина подслоя 20 нм). Скорость осаждения ВТСП-пленок составляет 0,3—0,5 нм/с при использовании ИАГ-лазеров с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 10 нс и частотой повторения 50 Гц. Удается получать пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  толщиной до 150—200 нм. Важным моментом является удаление лишнего окисного слоя  $\text{SiO}_2$  с поверхности подложки Si. Для этого в одной из методик подложка вначале прогревается в вакууме  $10^{-6}$  торр до  $800^\circ\text{C}$ , затем на нее наносится ультратонкий слой (2 нм) металлического Zr, в камеру подается кислород и осаждается подслоем  $\text{ZrO}_2$  (при  $T_D = 700^\circ\text{C}$ ). При таком методе получается прочный сплошной подслоем, а осажденные ВТСП-пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  имеют  $T_{ce} = 88,5$  К,  $T_c = 90$  К, отношение сопротивлений при 92 и 300 К составляет  $R_{92}/R_{300} = 0,34$ , зависимость сопротивления от температуры линейная,  $I_c > 10^6$  А/см<sup>2</sup> при  $T = 77$  К.

Еще более высокие параметры ВТСП-пленок на Si получены методом гомоэпитаксии, когда первые слои пленки (10—50 нм) осаждаются при пониженной температуре  $T_D = 650^\circ\text{C}$ , когда диффузия Si замедлена. Не прекращая осаждения

пленки, температура подложки постепенно повышается до оптимальной (720—740 °C), и процесс осаждения продолжается до требуемой толщины пленки. При таком методе удается вырастить качественные ВТСП-пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  на Si с подслоем поликристаллического  $\text{ZrO}_2$ , даже не удаляя естественного слоя окиси кремния [31].

Наличие тонкого слоя  $\text{SiO}_2$  на поверхности кремниевой подложки, как показано в [37], можно использовать даже для улучшения параметров ВТСП-пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . По-видимому, такой слой  $\text{SiO}_2$  частично предотвращает реакцию между кремнием и буферным слоем YSZ, а также уменьшает напряжения в нем, вызываемые несогласованностью решеток и разницей коэффициентов теплового расширения Si и YSZ. Наконец, нужно отметить, что хорошо зарекомендовали себя двойные YSZ/ $\text{Y}_2\text{O}_3$  и даже тройные YSZ/ $\text{Y}_2\text{O}_3$ /YSZ подслои [37]. Помимо улучшения параметров осаждаемых пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , для них наблюдалось уменьшение эффектов "старения". Для получения таких многослойных (составных) буферных покрытий была разработана методика импульсного лазерного испарения.

Лучшие результаты получены при использовании эксимерного лазера с длиной волны 308 нм. Применение такого лазера позволило получить пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  с  $T_{ce} = 89,5$  К и плотностью критического тока при 77 К  $I_c = 3,5 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup> [37]. Эти результаты уже практически не отличаются от параметров пленок на обычных диэлектрических подложках.

К сожалению, большая разница в коэффициентах теплового расширения между  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  и Si приводит к термически индуцированным напряжениям в пленках  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  при охлаждении. При толщинах пленок, превышающих 50—70 нм, эти напряжения вызывают образование микротрещин, что заметно понижает критические токи пленок [18, 38]. Даже при отсутствии явных трещин в напряженных пленках  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  на Si со временем наблюдаются изменение их свойств ("старение") и постепенное ухудшение сверхпроводящих параметров [39].

Представляют определенный интерес работы, в которых ВТСП-пленки осаждают на подложки из GaAs — полупроводникового материала, в некоторых отношениях превосходящего Si по своим параметрам. В работе [40] методом лазерного испарения ( $\lambda = 248$  нм) в кислороде получены сверхпроводящие пленки  $\text{YBaCuO}$  с началом перехода  $T_{co} = 80$  К на GaAs с тонким подслоем из  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  (толщиной 100 Å). Подслой предотвращал разложение GaAs при температуре осаждения пленки  $T_D = 600$  °C. Несомненно, что параметры пленок на GaAs могут быть дополнительно улучшены при оптимизации условий осаждения.

В работе [41] однородные пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  получены на подложках GaAs большой площади (диаметр 7,5 см). Нестабильные в вакууме выше 480 °C подложки были пассированы  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , после чего на их рабочую поверхность наносили подслои MgO. Таким образом подготовленные подложки выдерживали рабочую температуру 650 °C, необходимую для формирования пленки.

Отметим также возможность использования Si как подслоя на сапфировой подложке [42] для получения достаточно толстых (400 нм) пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  без термически индуцированных микротрещин, обычно сопровождающих такие пленки на Si. При этом используется также защитный слой YSZ между пленкой и Si-подслоем. Величина критического тока на таких пленках составляет  $I_c = 4,6 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup> при  $T = 77$  К.

Очень важной задачей для гибридной электроники является получение качественных ВТСП-пленок на полупроводниковых подложках большой площади. В работе [41] получены пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  на подложках из Si (подслои YSZ/ $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) и GaAs (подслои MgO) диаметром до 10 см с  $T_c = 85$ —86 К и критическим током при 77 К  $I_c = (1$ —2,7)  $\cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Авторы применили метод раздельного окисления осаждающейся пленки на вращающейся подложке. На подложку осаждались в

нужной пропорции чистые металлы Y, Ba и Cu из трех лодочек. Скорость осаждения каждого элемента контролировалась своим кварцевым монитором. Температура подложки 650 °С. В специальную зону подавался кислород давлением  $10^{-2}$  мбар для окисления пленки. При непрерывном вращении подложки осаждаемая в вакууме  $2 \cdot 10^{-5}$  мбар пленка попадала в зону повышенного давления кислорода, где и происходило ее окисление. Такой метод позволил получить весьма однородные по составу (1 %) и толщине (2 %) пленки на всей площади подложки.

При оптимизации условий осаждения ВТСП-пленки на полупроводниковые подложки методом лазерной абляции очень важно оптимизировать параметры лазерной плазмы. Этот вопрос, естественно, возникает при использовании "in situ"-метода и относительно высоких давлений кислорода, необходимых для окисления осаждаемых пленок.

Разработаны специальные модели разлета лазерной плазмы в кислороде в условиях осаждения ВТСП-пленок, которые позволяют сделать оценки скорости и энергии частиц вблизи подложки, температуры и плотности лазерной плазмы и других параметров, удовлетворительно согласующихся с данными, полученными при эксперименте [43]. При облучении мишени лазерным излучением с типичной мощностью  $\sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> происходит взрывное испарение поверхностных слоев мишени и образование плотной лазерной плазмы с температурой  $10^4 \div 10^5$  К. Скорость частиц при этом составляет  $10^3 \div 10^4$  м/с [44, 45].

Как видно из вышеизложенного, разработаны методики и получены ВТСП-пленки с высокими параметрами на полупроводниковых (Si, GaAs) подложках. Такие пленки и пленочные структуры на их основе уже вполне пригодны для создания различных гибридных устройств микроэлектроники. В последнее время исследованием возможностей создания таких устройств с необходимыми параметрами начинает заниматься все большее количество организаций и фирм США, Японии, Германии.

Изучаются возможности использования пленок ВТСП-соединений на полупроводниковых подложках и структур на их основе в ЭВМ и цифровой технике нового поколения, где они, несомненно, найдут применение. В устройствах сверхпроводниковой электроники наиболее перспективными приложениями таких пленок считаются межсоединения в гибридных ЭВМ нового поколения и цифровых устройствах, сверхскоростные приемники, пассивные и активные элементы СВЧ-техники.

Использование ВТСП-пленок в качестве межсоединений (микроразводных линий) приводит к уменьшению потерь, увеличению скорости обработки сигналов (достигаются тактовые частоты до десятков гигагерц), уплотнению элементов. Считается, что через два-три года ряд проектов по созданию устройств с использованием ВТСП-пленок выйдут на коммерческий уровень. Так, Управление перспективных исследовательских проектов МО США (ARPA) считает, что некоторые из финансируемых им ВТСП-проектов выйдут на коммерческий уровень к 1996 г. Наиболее вероятен успех проектов по сверхпроводящим межсоединениям для КМОП-микросхем и СВЧ пассивным элементам для тактических радиолокационных систем. Наиболее продвинуты в этом направлении работы фирмы "Conductus" (США), посвященные ВТСП-разводке КМОП-кристаллов. Фирма продемонстрировала действующий гибридный модуль, содержащий на подложке  $\text{LaAlO}_3$  десять полупроводниковых КМОП-микросхем с двухуровневой разводкой из ВТСП-пленок  $\text{YBaCuO}$  шириной 10 и 30 мкм. Проведено успешное тестирование модуля при температуре 77 К.

Специалисты Японии также считают полупроводниковые многокристалльные модули (МСМ) с ВТСП-межсоединениями одним из первых будущих крупных применений ВТСП. Более того, речь идет даже о суперМСМ (SMCM) — многокристалльных модулях с джозефсоновскими схемами и сверхпроводящими межсое-

динениями. Фирма "Куосега" совместно с Электротехнической лабораторией разработала SMCМ на тактовую частоту 1,2 ГГц. Устройство включает в себя сверхпроводящую разводку, объединяющую четыре джозефсоновских БИС (каждая на кристалле  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ ). Все интегральные схемы закреплены на одной кристаллической подложке  $16 \times 16 \text{ мм}^2$ . Полная гибридная схема содержит 24 тыс. джозефсоновских переходов.

Сотрудники Института прикладной физики Регенсбургского университета (Германия) совместно с Лабораторией сверхпроводимости ФИ РАН впервые создали резонатор Фабри-Перо дальнего ИК-диапазона на основе ВТСП, состоящий из двух плоскопараллельных кремниевых пластин с односторонними тонкими покрытиями из ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  [46]. Высокая прозрачность Si в ИК-диапазоне позволила достичь большой селективной прозрачности резонатора вплоть до частот порядка 20 ГГц. Таких частот не удавалось достигнуть с зеркалами из нормальных металлов.

Вариантом такого гибридного интерферометра является однопластинчатый эталон частоты дальнего ИК-диапазона, созданный сотрудниками тех же организаций. Это устройство состоит из плоскопараллельной кремниевой пластины с двусторонним покрытием (отражателями) из тонких ВТСП-пленок. Покрытия — эпитаксиальные ВТСП-пленки толщиной 20—40 нм играют роль полупрозрачных зеркал с низким уровнем поглощения ИК-излучения. Такие устройства, помимо решения прикладных задач, позволяют измерять с высокой точностью частотные зависимости оптических характеристик ВТСП-покрытий при разных температурах. Это — реальное приложение гибридных ВТСП-устройств в ИК-спектроскопии.

Интерференционный фильтр, созданный на основе такого ВТСП-резонатора дальнего ИК-диапазона (область терагерцевых частот), обладает на сегодняшний день добротностью порядка 200 при пропускающей способности около 50 %. Это выше наилучших результатов, которые были получены с использованием ячеистых зеркал из нормальных металлов.

Из других перспективных приложений ВТСП-пленок на Si-подложках отметим разработку болометра для широкой спектральной области на основе пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

Создание качественных ВТСП-пленок на полупроводниковых подложках, структур на их основе и в перспективе гибридных устройств — достаточно сложная и дорогостоящая задача. Существует еще ряд нерешенных проблем в этой области. Отметим основные из них:

- улучшение и оптимизация методик осаждения качественных ВТСП-пленок на полупроводниковые (кремниевые) подложки;

- разработка методик получения ВТСП-пленок на кремниевых подложках большой площади (до  $100 \text{ см}^2$ );

- развитие литографических методик, в первую очередь, современной электронной литографии, не приводящей к ухудшению параметров ВТСП-пленок на Si;

- разработка методик получения качественных пленок на подложках из других полупроводниковых материалов (прежде всего, из GaAs);

- разработка методик получения гетероструктур и сверхрешеток на основе пленок на полупроводниковых подложках, в перспективе — создание интегральных схем на базе таких структур;

- исследование долгосрочной стабильности ВТСП-пленок и структур на полупроводниковых подложках.

Конечная цель этого направления — создание эффективных цифровых устройств и других цифровых приборов, в которых применение ВТСП даст существенный выигрыш. Несомненно, это достаточно сложная, но многообещающая задача, требующая высокого уровня технологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание ВТСП-устройств с использованием полупроводниковых материалов, работающих при азотных температурах, перекрывающихся с рабочими температурами чисто полупроводниковых устройств, по-существу, формирует новую область техники — гибридной микроэлектроники ВТСП — полупроводники. Первые реальные примеры создания и применения гибридных устройств уже осуществлены фирмами США и Японии, организациями Германии и России. Без таких устройств трудно представить себе будущее медицины, метрологии, геофизики, а также космической и военной техники.

Работа поддерживается Научным советом по ВТСП и выполняется в рамках проекта № 93069 Государственной программы “Высокотемпературная сверхпроводимость”.

## Литература

1. *Bednorz J. G., Muller K. A.* // *Z. Phys. B.* 1986. V. 64. P. 189.
2. *Bendre S. T. et al.* // *Solid State Commun.* 1990. V. 73. P. 345.
3. *Myoren H. et al.* // *Japan J. Appl. Phys.* 1990. V. 29. P. 955.
4. *Jia Q. X., Anderson W. A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. P. 304.
5. *Miglino M. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. P. 859.
6. *Chromik S. et al.* // *Phys. Stat. Sol. (a).* 1990. V. 119. P. 155.
7. *Lin R. J., Wu P. T.* // *Japan J. Appl. Phys.* 1989. V. 28. P. L2200.
8. *Singh R. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 57. P. 3764.
9. *Appelboom H. M. et al.* // *Preprint Delft University of Technology, The Netherlands, 1990.*
10. *Байков И. С., Головашкин А. И.* Пленки ВТСП-соединений и структуры на их основе // *Прикладная физика*, 1994. № 1. С. 4.
11. *Alnot P. et al.* // *Solid State Commun.* 1988. V. 67. P. 275.
12. *Harada K. et al.* // *Japan J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. P. L1524.
13. *Simon R. W. et al.* // *Journ. of Supercond.* 1988. V. 1. P. 313.
14. *Mogro-Campero A.* // *Supercond. Sci. Technol.* 1990. V. 3. P. 155.
15. *Scheib et al.* // *Thin Solid Films.* 1989. V. 174. P. 5.
16. *Nakajima H. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. P. 1437.
17. *Mogro-Campero A. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 52. P. 1185.
18. *Fork D. K. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. P. 1161.
19. *Copetti C. A. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. P. 1429.
20. *Kwasnick R. F. et al.* // *J. Mater. Res.* 1989. V. 4. P. 257.
21. *Fork D. K. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 58. P. 2294.
22. *Baixeras J. et al.* // *Journ. Less-Common Metals.* 1990. V. 164—165. P. 359.
23. *De Reus R. et al.* // *Materials Sci. and Engineering B.* 1990. V. 7. P. 135.
24. *Wu X. D. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. P. 754.
25. *Mogro-Campero A. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 52. P. 584.
26. *Adachi H. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. P. 2263.
27. *Hayashi S. et al.* // *Japan J. Appl. Phys.* 1988. V. 27. P. L1487.
28. *Данилин Б. С.* *Итог. науки и техники.* 1990. Т. 26. С. 133.
29. *Koren G. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. P. 1920.
30. *Berberich P. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. P. 925.
31. *Krasnosvobodtsev S. I., Pechen E. V.* // *Physica C.* 1991. V. 185—189. P. 2097.
32. *Watanachchi S. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. P. 234; *High-T<sub>c</sub> Update.* 1988. V. 2. P. 8.
33. *Edelstein A. S. et al.* // *J. Cryst. Growth.* 1987. V. 85. P. 619.
34. *Serbezov V. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. P. 6953.
35. *Golovashkin A. I. et al.* // *Physica C.* 1989. V. 162—164. P. 715.
36. *Головашкин А. И. и др.* // *Тр. совещ. по проблемам ВТСП. — Свердловск.* 1987. Ч. 2. С. 216.
37. *Pechen E. V. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. P. 3614; *Phys. Status Sol. (a).* 1992. V. 131. P. 179.
38. *Prusseit W. et al.* // *Physica C.* 1992. V. 201. P. 249.
39. *Copetti C. A. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 73. P. 1339.
40. *Rao M. R. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 56. P. 1905.

41. *Prusseit W.* et al.//ISEC-93 (Boulder, USA), 1993, P. 201.
42. *Fork D. K.* et al.//Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 2432.
43. *Предтеченский М. Р., Майоров А. П.*//СФХТ. 1993. Т. 6. С. 1018.
44. *Venkatesan T.* et al.//Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. P. 1431.
45. *Ying Q. Y.* et al.//Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. P. 1762.
46. *Pechen E. V.* et al.//Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 1980.

## **FILMS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS ON SEMICONDUCTOR SUBSTRATES AND SYSTEMS ON THEIR BASE**

**I. 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

The deposition methods of high- $T_c$  superconducting films on semiconductor substrates and the conditions of optimum film parameters are considered. The examples of high-quality films and systems on their base are given.