3. Стеблевский А.В., Алиханян А.С., Веденкина Л.Г. и др. Масс-спектральное исследование процессов сублимации некоторых кластерных соединений рения // Коорд. химия, 1984. — Т. 10. — № 1. — С. 72–76.

4. Cotton F. A., Gage L. D., Rice C. E. Some New Types of Quadruply Bonded Dirhenium Compounds Containing Bridging Carboxylato Groups // Inorg. Chem., 1979. — Vol. 18. — P. 1138–1142.

5. Shtemenko A.V. Binuclear Rhenium Clusters as a Basis for Metal Coatings // Rhenium and Rhenium Alloys. — Pensilvania: TMS publication, 1997. — P. 173–178.

6. Голованева И.Ф., Бовыкин Б.А., Штеменко А.В. и др. // Журн. неорг. химии, 1987. — Т. 32. — № 2. — С. 387.

7. Штеменко А.В., Котельникова А.С., Бовыкин Б.А., Голованева И.Ф. // Журн. неорг. химии, 1986. — Т. 31. — № 2. — С. 399.

8. Штеменко А.В., Голиченко А.А., Кожура О.В. // Вопросы химии и хим. технологии, 2000. — № 2. — С. 21.

9. Штеменко А.В., Столяренко В.Г., Коваленко И.Л. Термические свойства кластерных тетра-μ-фосфатов дирения(III) // Вопросы химии и хим. технологии, 2006. — № 3. — С. 22–27.

10. Федоров С. GetData 2.24 Программа для оцифровки графиков.

11. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физ.-хим. анализа вяжущих веществ: Учеб.пособие. — М.: Высш.школа, 1981. — 335 с.

12. Логвиненко В.А. Термический анализ координационных соединений и клатратов. — Новосибирск: Наука, 1982. — 127 с.

13. Лебедев К.Б. Рений. — М.: Металлургиздат, 1963. — 190 с.

14. Штеменко А.В., Матросов А.С., Тихонов В.И. // Вопросы химии и хим. технологии, 2000. — № 2. — С. 247.

© Мельник С.Г., Штеменко О.В., 2010

Поступила в редакцию 24.02.2010 г.

УДК 546. 65' 56' 43

Войтенко Т.А. (Київський національний університет імені Тараса Шевченка)

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ОДЕРЖАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК ВТНП МАТЕРІАЛІВ

Вивчено методи синтезу тонких плівок високотемпературних надпровідних матеріалів. Показано, що в залежності від кінцевого ВТНП продукту та області його застосування оптимальними можуть виявитися досить різні технології одержання.

Ключові слова: високотемпературні надпровідники, тонкі плівки, методи одержання.

Одержання високотемпературних надпровідних (ВТНП) матеріалів із заданими характеристиками є важливою метою, сформульованою практично одразу ж після відкриття цього класу складних купратів. Поява ВТНП з переходом у надпровідний стан при температурах, що перевищують температуру рідкого азоту, відкрило шлях до розробки приладів з унікальними параметрами, які функціонують при досить простих і відносно дешевих системах охолодження, замість традиційного недешевого гелієвого обладнання. Перспективні області застосування ВТНП включають компактні і потужні двигуни для кораблів і підводних човнів, генератори, накопичувачі та резонатори для військової техніки, електромагнітні екрани, магнітні і електромагнітні датчики, магнітометри, швидкодіючі і компактні мікропроцесори, мікроелектронні СВЧ-компоненти. Надзвичайно широкий спектр застосування ВТНП-матеріалів обумовлений відсутністю втрат на постійному струмі і невеликими втратами на

змінному, екрануванням магнітних і електромагнітних полів, а також можливістю передачі сигналів з мінімальним спотворенням. Незважаючи на велику кількість форм і типів ВТНП матеріалів, лише деякі з них зможуть виграти конкурентну боротьбу з вже існуючими приладами у енергетиці, електроніці і медицині [1]. Серед таких матеріалів важливе місце посідають плівки. Плівкові матеріали можна класифікувати з різноманітних точок зору, зокрема за товщиною: тонкі (до 1 мкм) та товсті плівки і покриття (10 мкм і більше). Товстоплівкові покриття, в значній мірі, характеризуються об'ємними процесами і схожі з керамічними чи монокристалічними матеріалами. Тонкі плівки, в певних межах, наближаються до двовимірних об'єктів, і їхні властивості у більшості випадків визначаються властивостями поверхні та явищами, які на ній відбуваються. Використання плівок дозволило створити пілотні зразки систем зв'язку нового покоління (електромагнітні екрани, модулятори, антенни, комутатори і фільтри СВЧ-сигналів), болометри, кабелі, обмежувачі струму, сквиди, принципові схеми надшвидкодіючих комп'ютерів, чутливих медичних томографів тощо [1–4]. Тому для подальшого впровадження даних матеріалів необхідна розробка відтворюваних технологій їх одержання, придатних для промислових потужностей і, зокрема, плівок високотемпературного надпровідника $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO).

Метою даної роботи є огляд, аналіз і узагальнення літературних даних щодо методів одержання тонких плівкових ВТНП матеріалів на основі рідкісноземельних елементів.

На сьогодняшній день існує досить велика кількість технологій [1, 5–9], які дозволяють одержувати покриття досить різної якості: від епітаксільних плівок з товщиною, меншою 100 мкм до полікристалічних шарів одержання тонких плівок порядку 0,1 мкм. Крім того, відомо, що одним із шляхів економії електроенергії є зменшення втрат на нагрівання, яке супроводжує передачу електроенергії по дротах. Радикальне вирішення цієї задачі полягає у використанні надпровідників, за якими постійний струм протікає без усіляких втрат. Одним із критичних параметрів, який обмежує існування надпровідності, є критична густина струму (j_c). Тому виготовлення надпровідних матеріалів для досягнення високих значень j_c є актуальним завданням фізики і технології виробництва високотемпературних надпровідників. Варто відзначити, що густина критичного струму в тонких плівках купратних ВТНП, зазвичай набагато вище, ніж у кристалах [10–11]. Зважаючи на складність фізико-хімічних властивостей матеріалів на основі YBCO, кожен з методів синтезу має і свої специфічні переваги, і недоліки, які в тій чи іншій мірі можуть бути успішно подолані.

Для одержання тонких епітаксіальних YBCO-плівок використовують різні методи, які умовно можна розділити на фізичні та хімічні. Так, до перших, як правило, відносять термічне, молекулярно-променеве та електронно-променеве випаровування, катодне розпилення, імпульсне лазерне і магнетронне напилення плівок.

Термічне випаровування (ТВ) проводиться, зазвичай, у вакуумі і пари матеріалу, що випаровуються, осаджуються на підложку із тугоплавкого матеріалу, який не реагує з випаровуваною речовиною, а нагрівання проводиться за допомогою електричного струму. Є декілька видів термічного випаровування: термічне випаровування із різних випаровувачів і ударне термічне випаровування. У першому варіанті методу контролюється швидкість випаровування і товщина осаджуваної плівки кожного з матеріалів, що осаджується. Компоненти, які випаровуються, в потрібному кількісному співвідношенні одночасно осаджуються і реагують на підложці. Допускається також і застосування послідовного випаровування компонентів з наступним

відпалюванням чи перемішуванням. Недоліком даного методу є те, що для забезпечення стехіометричного складу плівки необхідний постійний контроль за швидкістю осадження. За даною технологією були одержані плівки $YBa_2Cu_3O_x$ товщиною d≤1мкм, температурою переходу в надпровідний стан T_c>77К та густиною критичного струму j_c>10^5 А/см^2 [12–14]. Ударне термічне випаровування проводиться або за допомогою імпульсу струму чи перегрівання підложки. При цьому температура підложки повинна суттєво перевищувати температуру плавлення матеріалів, що випаровуються. Внаслідок чого суміш необхідного складу випарюється повністю, що в певній мірі і є перевагою даного методу [5].

Молекулярно-променеве (МПВ) та електронно-променеве (ЕПВ) випаровування — методи, які є близькими до термічного випаровування. У першому випадку, атомний (молекулярний) пучок із спеціальної комірки направляється на підложку, де і осаджується плівка потрібного складу. В іншому випадку, в якості джерела використовується електронна пушка. Так, методом МПВ були одержані плівки $DyBa_2Cu_3O_x$ з d=1мкм, T_c=89 К та критичною густиною струму 4,8×10^5 А/см^2 при 4,2 К і 3,9×10^4 А/см^2 при 77 К, $YbBa_2Cu_3O_x$ $ErBa_2Cu_3O_x$ з d=0,2 мкм та T_c=80 К та $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [15–17]. В роботах [18–19] методом ЕПВ одержували плівки складу $YBa_2Cu_3O_x$ з наступними характеристиками d=0,5–1 мкм та T_c=90–95 К та густиною критичного струму j_c = 4,2×10^5 А/см^2 при T_c=77 К. Швидкість осадження плівок варіювалась в широких межах від 0,01 до 1 н/с. Одержання ВТНП проводили при різних температурах підложок (від 20°С до 900°С). Плівки, що утворювались при цьому, були аморфними чи занадто розупорядкованими. Відпалення, зазвичай у атмосфері кисню, призводило до окиснення та кристалізації плівок.

Для катодного розпилення характерно три варіанти одержання плівок: розпилення на постійному струмі (dc-cathode sputtering), високочастотне розпилення (rf-cathode sputtering) та розпилення на низькочастотному змінному струмі (ac-cathode sputtering) [5]. Найчастіше для одержання плівок складу $YBa_2Cu_3O_x$ використовують розпилення на постійному струмі (dc-cathode sputtering) у чистому Ar чи суміші аргону і кисню з використанням однієї мішені, яка повинні відповідати умовам (за складом, чистотою тощо). Так, було одержано плівки YBaCuO з d=0,1 мкм, T_c~90 К, j_c(77K)~10^6 А/см^2 [20–25]. Недоліком катодного розпилення є те, що воно проводиться в атмосфері кисню, і йони O^-, що мають високу енергію, бомбардуючи плівку, погіршують її властивості.

Серед великої кількості методів одержання тонких YBCO-плівок значне місце посідає магнетронне розпилення. В основі цієї методики лежить катодне розпилення у магнітному полі [5,7,26]. Магнітне поле утримує йони поблизу мішені, за рахунок чого і підвищується ефективність розпилення. Як і у випадку з попереднім методом для магнетронного розпилення характерне розпилення на постійному та високочастотному струмах. Крім того, іноді застосовують і змішану методику синтезу тонких плівок. Проте, як і у попередньому випадку найбільш поширеним, простішим і надійнішим є метод магнетронного розпилення на постійному струмі. Однак, в даному випадку є і зворотній бік, зокрема, як було відмічено у [26] в процесі осадження плівок за допомогою магнетронних розпилюючих пристроїв (МРП) температура осадження різнилась ≈1,5 рази, магнітне поле у мішені ≈2 рази, співвідношення аргону та кисню в робочій суміші ≈4 раз. Суттєво відрізняються конструкції катодних вузлів МРП і геометрія розташування підложки відносно розпилюючої мішені. В той же час даним методом були одержані плівки досить високої якості: критичною температура 90 К та густиною критичного струму 4 мА/см^2 [26].

Імпульсне лазерне випаровування (ІЛВ) [5,7,27] досить широко застосовується при нанесенні ВТНП-плівок. Сутність цього методу полягає у тому, що речовина із щільної та однорідної мішені вибивається високоенергетичним пучком і мікрокластерами переноситься на підложку. Головна його перевага — можливість однаково добре випаровувати всі хімічні елементи, що містяться у мішені. Динаміка процесу така, що склад плівки майже повністю повторює склад мішені. При правильному підборі температури і тиску відбувається пошаровий ріст ВТНП-плівки з необхідною структурною фазою. За допомогою цього методу були одержані найбільш досконалі плівки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ кераміки, зокрема товщиною від 50 нм до 5 мкм і критичною температурою T_c=90-91 К. До недоліків ІЛВ варто віднести труднощі використання мішеней діаметром більше 60 мм і, крім того, в ряді випадків спостерігається випаровування кластерів (крапель).

Основним же недоліком фізичних методів одержання плівок є висока вартість і неможливість одержання масштабних зразків, тому головну роль у цьому напрямку відіграють так звані хімічні методи, а саме метод хімічного осадження із газової фази (CVD-Chemical Vapour Deposition) [1,6,9,28].

Розвиваючись тривалий час [29], CVD-технології знаходять все нові способи реалізації і області застосування. Головними перевагами, у порівнянні з іншими методами, є, по-перше можливість реалізації в рамках методу CVD процесів одержання функціональних матеріалів і покриттів у менш енергетично-витратних, та таких, що не потребують спеціальних умов (високого вакууму, розчинів електролітів, розплавів та ін.) режимах; по-друге, велика розмаїтість вихідних реагентів — прекурсорів дозволяє оптимізувати властивості як одержуваного матеріалу так і вихідних продуктів реакції, що має технологічне і екологічне значення і, нарешті, газофазне одержання функціональних матеріалів позбавлено специфічних недоліків інших методів (екранування, тіньового ефекту та ін.), що викликано особливостями газової фази. Завдяки характерним їй позитивним властивостям, серед яких можна виділити простоту, масовість, надійність результатів, різноманітність і якість матеріалів, що синтезуються. CVD технологія з кожним роком розширює сфери застосування. В даний час біля чверті функціональних плівкових матеріалів і покриттів, що знаходять саме широке застосування в багатьох галузях промисловості, синтезуються різними модифікаціями CVD технології. Світовий досвід широкого застосування метода CVD для нанесення епітаксіальних плівок напівпровідників і оксидних покрить різного функціонального призначення дає підстави стверджувати, що і в технології плівок ВТНП цей метод поступово стає один із головних

Сутність цієї технології полягає в тому, що компоненти одержуваної плівки транспортуються у вигляді парів їх летких сполук до підложки, де відбувається розклад парів і утворення плівки заданого складу. Найчастіше для цього використовують леткі галогеніди, гідриди чи борогідріди, карбоніли, карбоксилати, перхлорати тощо та металоорганічні сполуки (такий різновид методу на основі осадження на монокристалічних підложках продуктів термічного розкладу високолетких металоорганічних прекурсорів називають MOCVD — Metal Organic Chemical Vapour Deposition Technique). Розкладення плівки зазвичай проводять або термічним методом, або застосовуючи інші шляхи, зокрема плазма, УФ-, ІЧ-лазерне випромінення, електронний та йонний удари.

В усіх варіантах методу CVD необхідним є вибір летких сполук, які повинні задовольняти щонайменше двом вимогам: 1) мати технологічно сприйнятливий тиск пари; 2) переходити в парову фазу (випаровуватись чи сублімуватись) без розкладу конденсованої фази, оскільки при розкладі неодмінно спостерігається зміна леткості, що затруднює збереження постійності швидкості нанесення і складу плівки.

Найбільш широкого поширення набули леткі реагенти, ліганди яких являють собою органічні сполуки. Основні причини збільшення використання органічних сполук пов'язані з можливістю здійснення CVD синтезу при низьких температурах, а також різноманітністю тонкоплівкових матеріалів, які можуть бути отримані з використанням таких початкових реагентів.

Одним із різновидів метода осадження із газової фази є метод MOCVD. Сутність цього метода [1,6,9,28] полягає у тому, що металічні компоненти плівки надходять у вигляді парів металоорганічних летких сполук у реактор, змішуються з газоподібним окисником, після чого відбувається розклад парів у реакторі з нагрітими стінками чи підложці з подальшим утворенням плівки ВТНП-фази. В якості летких сполук найчастіше використовують β-дикетонати металів — хелатні металоорганічні комплекси, що мають високу леткість при порівняно низьких температурах (100–300°С). Зазвичай, найбільші труднощі пов'язані з перенесенням барію через парову фазу. Такі комплекси барію олігомеризовані як у твердій, так і в паровій фазі. Це пов'язано з координаційною ненасиченістю Ba^{2+} і високою йонністю зв'язку барій-кисень. З метою стабілізації дипиваілметаната барію використовують аддукт дипиваілметану з фенентроліном, який насичує координаційну сферу барію, завдяки чому відбувається кількісний перехід такого комплекса в пару [1, 26].

Тому розробка нових металоорганічних летких сполук є одним із ключових моментів суттевого поліпшення характеристик і можливостей метода MOCVD в цілому.

Дана технологія дозволяє одержувати тонкі плівки ВТНП, які за своїми характеристиками можна порівняти з плівками, одержаними фізичними методами, проте метод MOCVD має свої незаперечні переваги, зокрема, універсальність по відношенню до складу одержуваних матеріалів; можливість досягнення високих швидкостей осадження (до декількох міліметрів за годину) при збереженні належної якості плівки; перехід від високовакуумної апаратури до проточного обладнання, яке функціонує при тисках 10^{-3}–1 атм; простота і відносна дешевизна обладнання, в порівнянні з фізичними методами; гнучкість процесу на етапі відпрацювання технологічного режиму, в першу чергу, за рахунок можливості зміни складу парової фази.

Проте вищезазначена технологія має і свої недоліки, зокрема, складнощі в керуванні катіонною і аніонною стехіометрією плівки. Це пов'язано з тим, що процес осадження з газової фази залежить від великої кількості факторів, зокрема, температури, загального тиску, парціального тиску кисню, вуглекислого газу і води (продуктів окиснення органічної складової сполук), загальний склад і однорідність змішування летких компонентів у газовій фазі тощо. Найбільш перспективний шлях задати склад пари - миттєве випаровування суміші летких речовин із єдиного джерела. Цього досягають двома шляхами, зокрема, використовуючи аерозоль [26], одержаний із розчину металоорганічних сполук у органічному розчиннику чи при автоматизованому імпульсному випаровуванні суміші металоорганічних сполук із стрічкового джерела.

Особливість першого варіанта методу полягає у сильному впливі парів розчинника на процес осадження плівок (термічний ефект окиснення розчинника, зниження парціального тиску кисню, підвищення парціального тиску вуглекислого газу і води). Проведені термодинамічні дослідження звели ці ефекти до мінімуму, і дозволили оптимізувати умови осадження плівки в реакторі з холодними стінками таі індукційним нагріванням підложки. Використання аерозольного джерела дозволяє досягати високих швидкостей осадження, забезпечуючи, тим самим, одночасно досить добру відтворюваність складу і морфологію плівок R123 і Bi2212.

Другий варіант методу, пов'язаний із комп'ютерним керуванням процесу, полягає у нанесенні крапель органічного розчину, що містить леткі комплексні сполуки металів у заданому співвідношенні, на транспортну стрічку із скловолокна. При цьому пара, що утворюється при імпульсному нагріванні стрічки у вакуумній камері, відводиться до підложки. Дана технологія виявилася досить зручною для одержання багатошарових плівкових структур складного хімічного складу, оскільки дозволяє змінювати склад пари і кількість речовин, що випаровуються за один імпульс [30–31].

Інша, технологічна проблема, в більшості випадків, стосується ВТНП сполук типу Bi2212 і пов'язана з необхідністю створення оптимальної морфології плівок. Так, при дослідженні впливу різних факторів на орієнтацію плівок встановлено, що додавання надлишку сполук бісмута і купруму сприяє формуванню с-орієнованих плівок, в той час, як додавання лужноземельного елемента призводить до α-орієнтації плівки [8]. Це явище пов'язане з тим, що надлишок бісмуту і купрума призводить до утворення рівноважної рідкої фази, що дозволяє підвищити рухливість компонентів плівки і сприяє формуванню с-орієтації, яка є термодинамічно більш вигідною, в той час, як в умовах кінетичного контролю утворюється α-орієнтація. В цілому, морфологія (а саме полікристалічність, планарність, орієнтація плівки, наявність мікровключень ненадпровідних фаз, мікротріщини тощо) залежать від великої кількості технологічних факторів, які повинні бути ретельно оптимізовані.

Основною і загальною для всіх методів одержання тонких плівок є проблема вибору підложки, до яких висувають наступні вимоги: підложки повинні бути достатньо хімічно інертними, щоб запобігти забрудненню ВТНП-фази сторонніми компонентами; підложки повинні бути недорогими і комерційно доступними. Крім того, матеріал, з якого виготовлена підложка повинен володіти низкою специфічних фізичних властивостей, зокрема, мати досить невелику різницю парметрів кристалічної гратки з осаджуваною плівкою; мати близький до ВТНП-фази коефіцієнт розширення для запобігання утворення мікротріщин у плівці при температурних змінах; не мати фазових переходів, які могли б суттєво погіршити морфологію плівок; мати низьку діелектричну проникність, що дає змогу використовувати їх у мікрохвильових приладах та мікроелектроніці. Проте, практично жодна з відомих підложок не відповідає повністю всім перерахованим вимогам. До найбільш поширеним підложок можна віднести $SrTiO_3$, $NdGaO_3$ і $LaAlO_3$ [8,32]. Останнім часом деякі масивні монокристали Y123, Nd123 використовувались для напилення R123 ВТНП-плівок [33], однак такі монокристали є надпровідниками, а не діелектриками і характеризуються тетра-орто переходом. Більш перспективним є використання ненадпровідних тетрагональних твердих розчинів типу $Pr_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_z$ [34]. Крім того, можливе використання діелектричних монокристалів $Nd_{1,85}Ba_{1,15}Cu_3O_z$, для яких характерним є висока ступінь ромбічності, відсутність тетра-орто переходу, висока узгодженість параметрів з ВТНП-плівками R123 фаз, а також низький ступінь кисневої нестехіометрії [35–37].

Таким чином, серед найбільш актуальних практичних задач технології MOCVD-плівок можна виділити наступні: нанесення плівок $RBa_2Cu_3O_{7-x}$ на бікристалічні підложки ($SrTiO_3$, сапфір), і формування на їхній основі джозефсоновських структур (логістори, SQUID-магнетометри тощо); отримання плівок ВТНП на підложках з великою площею; вирішення проблеми двохстороннього нанесення плівок; досягнення високих надпровідних характеристик (j_c і R_s) в тонких плівках ВТНП на традиційних для електронної техніки підложках (R-сапфір, Si) з використанням високоякісного буферного шару CeO_2 [31].

Останнім часом викликають зацікавленість плівки різних “легких” РЗЕ-123, оскільки в них можуть проявлятися ефекти пінінга не попередньо виділених продуктах фазового розпаду, а також ефекти стабілізації метастабільних фаз, посилення критичних струмів в твердих розчинах. Інша актуальна і масштабна задача, у вирішенні якої технологія CVD поступово виявляється ключовою є одержання покрить з високою здатністю проводити струм на вкритих буферним шаром гнучких металевих стрічках із нікеля і його сплавів, що текстуровані шляхом прокатки і відпалювання [32].

Таким чином варто відмітити, що незалежно від методу, одержання плівок високої якості пов’язане з вирішенням двох основних задач: досягненням стехіометричного складу, що дозволяє запобігти утворенню домішкових фаз та виключенням взаємної дифузії матеріалів підложки і плівки. Крім того, вибір тієї чи іншої методики одержання тонких плівок залежить від можливостей лабораторії, конкретної поставленої задачі, а також від майстерності експериментатора.

Література

1. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Химические принципы получения металлооксидных сверхпроводников // Успехи химии, 2000. — Т. 89. — Вып. 1. — С. 1–34.

2. Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А. Наносенсоры на основе сверхтонких пленок редкоземельных соединений // Нанотехника, 2009. — № 1. — С. 45–48.

3. Simon R.W., Hammond R.B., Berkowitz S.J., Willemsen B.A. Superconducting microwave filter systems for cellular telephone base stations // Proceedings of the IEEE, 2004. — V. 92. — P. 1585–1596.

4. Herbert C. YBaCuO and REBaCuO HTS for applications // International Journal of Applied Ceramic Technology, 2007. — V. 4. — P. 203–216.

5. Головашкин А.И. Методы получения пленок и покрытий из высокотемпературных сверхпроводников // ЖВХО им. Д.И.Менделеева, 1989. — Т. 34. — Вып. 4. —С. 481–492.

6. Кауль А.Р. Химические методы получения пленок и покрытий ВТСП // ЖВХО им. Д.И.Менделеева, 1989. — Т. 34. — Вып. 4. — С. 492–503.

7. Driessche I. Van, Schoofs B., Penneman G., Bruneel E., Hoste S. Review of the application of high temperature superconductors in coated conductor development and the measurement of their properties // Measurement science review, 2005. — V. 5. — P. 19–29.

8. Goyal A., Norton D.P., Christen D.K., Specht E.D. Epitaxial superconductors on rolling-assisted biaxially-textured substrates (RABiTS): A route towards high critical current density wire // Applied Superconductivity, 1996. — V. 4. — P. 403–427.

9. Мастеров Д.В., Павлов С.А. Парафин А.Е., Дроздов Ю.Н. Получение тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника Y-Ba-Cu-O для высокочастотных применений в упрощенной магнетронной системе напыления // Журнал технической физики, 2007. — Т .77. — Вып. 10. — С. 103–107.

10. Пашицкий Э.А., Вакарюк В.И. Пиннинг вихрей Абрикосова на дислокациях и критический ток в высокотемпературных сверхпроводниках // ФНТ, 2002. — Т. 28. —№ 1. — С. 16–23.

11. Lan M.D., Lui J.Z., Jia Y.X., Zhang L., Nagata Y., Klavins P., Shelton R. Resistivity and upper critical field of $YBa_2Cu_{3-x}Fe_xO_{7-x}$ single crystals // Phys. Rew. B, 1993.-V.476.-№1.-P.457-462.

12. Qui C.X., Shih I. Y-Ba-Cu-O thin films prepared by a multilayer vacuum method // Appl.Phys.Lett., 1988. — V. 52. — P. 587–589.

13. Nemetschek R. Continuous YBCO — Tape Coating by Thermal Evaporation // Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 2002. — V. 689. — P. 315–321.

14. Norton D.P. Epitaxial YBCO on Biaxially Textured Nickel (001): An Approach to Superconducting Tapes with High Critical Current Density // Science, 1996. — V. 274. — P. 755–757.

15. Webb C., Weng S.-L., Eckstein J.N. Growth of high T_c superconducting thin films using molecular beam epitaxy techniques // Appl.Phys.Lett., 1987. — V. 51. — P. 1191–1193.

16. Wang H. S., Eissler D., Dietsche W., Fischer A., Ploog K. Molecular beam epitaxial growth and structural properties of $DyBa_2Cu_3O_{7-y}$ superconducting thin films // Journal of Crystal Growth, 1993. — V. 126. — P. 565–577.

17. Karimoto S., Sato H., Makimoto T. Influence of impurity of MgO substrates on properties of molecular beam epitaxy-grown superconducting $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films // Jpn. J. Appl. Phys., 2006. — V. 45. — P. L419–L421.

18. Mooij J.E., Marel D. Van der, Appelboom H.M. et al Thin films of YBaCuO by e-beam evaporation // Physica C, 1988. — V. 153–155. — P. 771–775.

19. Gorur O.; Kucukomeroglu T., Terzioglu C., Varilci A., Altunbas M. The effect of Ag diffusion on properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films produced by electron beam deposition techniques // Physica C. Superconductivity, 2005. — V. 418. — P. 35–42.

20. Schurig T., Menkel S., Quan Z., Beyer J., Guttler B. et al Large-area YBCO thin film deposition using linear hollow cathode discharge sputtering // Physica C, 1996. — V. 262. — P. 89–97.

21. Beyer J., Schurig' Th., Menkel S., Quan Z., Koch H. XPS investigation of the surface composition of sputtered YBCO thin films // Physica C, 1995. — V. 246. — P. 156–162.

22. Behner H., Gieres G., Sipos B. Characterization of sputter-deposited YBaCuO filmsby X-ray photoelectron spectroscopy // Fresenius J Anal Chem, 1991. — V. 341. — P. 301–307.

23. Park H., Kobayashi T., Goto T. Properties of bridge-type weak-link device with YBCO thin film // Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2007. — V. 76. — P. 110–116.

24. Ludwig F., Hinkel V., Schurig T., Müller J.-P., Stösslein U. Preparation of YBCO thin films by means of a hollow cathode discharge sputtering device // Physica C., 1991. — V. 180, Issue 1–4. — P. 85–89.

25. Kim H.S., Chung K.C., Lee B.S., Lim S.M., Youm D. Effects of plasma on the growth conditions of $YBa_2Cu_3O_{7-\partial}$ thin films in dc sputtering // Supercond. Sci. Technol., 2003.-V.16.-P.760–767.

26. Tret'yakov Yu.D., Gudilin E.A., Reddy E.S., Schmitz G.J. Modern preparation methods of oriented think films of superconducting cuprates // Crystallography reports, 2004. — V. 49. — № 2. — P. 233–239.

27. Li M., Ma B., Korita R.E., Fisher B.L., Venkataraman K. Balachandran U. Pulsed laser deposition of YBCO thin films on IBAD–YSZ substrates // Supercond. Sci. Technol., 2003. — V. 16. — P. 105–109.

28. Stadel O., Muydinov R.Yu., Keune H., Schmidt J., Wahl G., Samoilenkov S.V., Gorbenko O.Yu., Melnikov O.V., Korsakov I.E., Kaul A.R. MOCVD of YBCO and Buffer Layers on Textured Ni Alloyed Tapes // IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007. — V. 17. — P. 3483–3487.

29. Счастливцев В.М., Гервасьева И.В., Родионов Д.П., Хлебникова Ю.В., Досовицкий Г.А., Бледнов А.В., Горбенко О.Ю., Кауль А.Р., Сивков М.Н., Штырлов А.С. Ленточные эпитаксиальные подложки из сплавов Ni-Pd и Ni-W-Pd для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. // Доклады Академии Наук, 2007. — V. 412. — P. 361–368.

30. Samoylenkov S.V., Gorbenko O.Yu., Kaul A.R., Tretyakov Yu.D. $LuBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films prepared using MOCVD // J.Mater. Chem., 1996. — V. 6. — P. 623–627.

31. Graboy I.E., Kaul A.R., Markov N.V., Maleev V.A., Polyakov S.N., Svechnikov V.L., Zandbergen H.W., Dahmen K.- H. An improvement of surface smoothness and lattice match of CeO_2 buffer layers on R-sapphire processed by MOCVD // Journal of Alloys and Compounds, 1997. — V. 251. — P. 318–321.

32. Hampden-Smith M.J., Kodas T.T. Chemical Vapour Deposition of Metals. Part 1. An Overview of CVD Processes // Journal Chemical Vapour Deposition, 1995. — V. 1. — P. 8–23.

33. Usagawa T., Ishimaru Y., Wen J., Koyama S., Enomoto Y. (110) $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ homoepitaxy on (110) $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal substrates // Jpn.J.Appl.Phys., 1997. — V. 36. — P. L100–L103.

34. Shiohara Y., Endo A. Crystal growth of bulk high-Tc superconducting oxide materials // Materials Science and Engineering, 1997. — V. 19. — № 1–2. — P. 1–86.

35. Goodilin E.A., Kambara M., Umeda T., Shiohara Y. Crystal growth of the neodymium-rich $Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_z$ solid solution // Materials Science and Engineering B, 1998. — V. 53. — № 1–2. — P. 54–61.

36. Goodilin E., Oka A., Wen J.G., Shiohara Y., Kambara M., Umeda T. Twins and related morphology of as-grown neodymium-rich $Nd_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_z$ crystals // Physica C, 1998. — V. 299. — № 3–4. — P. 279–300.

37. Gorbenko O.Yu., Fuflyigin V.N., Erokhin Yu.Yu., Graboy I.E., Kaul A.R., Tretyakov Yu.D., Wahl G., Klippe L. YBCO and BSCCO thin films prepared by wet MOCVD // J. Mater. Chem., 1994. — V. 4. — P. 1585–1589.

© Войтенко Т.А., 2010

Поступила в редакцию 9.02.2010 г.