

05.4; 11

© 1992

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ $YBCO$ ПЛЕНОК НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ ОТ СТРУКТУРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО YSZ СЛОЯ

Ю.А. Б о й к о в, З.Г. И в а н о в*, Т.Б. Ж у к о в а,
Дж. Б р о р с о н*, Е. О л с о н*, Т. К л а ё с о н*

Исследование особенностей формирования тонких слоев $YBaCuO$ ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) на кремниевых подложках представляет значительный интерес с точки зрения возможного применения ВТСП пленок в микроэлектронике. Кремний и $YBCO$, как известно [1], активно взаимодействуют при температурах, используемых при выращивании эпитаксиальных пленок оксидных сверхпроводников. Для уменьшения химического взаимодействия между $YBCO$ пленкой и кремниевой подложкой используют различные промежуточные слои CeO_2 [2], $BaTiO_3/MgAl_2O_4$ [3], Y_2O_3/YSZ [4] и т. д.

Чтобы промежуточный слой мог выполнять роль буфера, ослабляющего взаимодействие между пленкой и подложкой, он должен быть химически инертным по отношению к контактирующим с ним материалам и должен существенно ослаблять диффузионный перенос между ними. Наилучшие результаты достигаются в том случае, когда промежуточный слой эпитаксиально сопряжен как с подложкой, так и с пленкой, поскольку дефекты структуры в буферном слое способствуют значительной интенсификации диффузионных процессов. Использование промежуточных слоев позволяет не только создать условия для формирования эпитаксиальных пленок $YBCO$ на поверхности кремния, но может также способствовать снижению уровня упругих напряжений в ВТСП пленке, возникающих вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения $YBCO$ и Si .

Наиболее широко и успешно в качестве промежуточных слоев при выращивании ВТСП пленок на кремнии используются тонкие пленки $YSZ [(1-x)ZrO_2 + xY_2O_3]$. YSZ , как известно [5], инертен по отношению к Si ($T < 800^\circ C$) и может быть эпитаксиально выращен на его поверхности. Существенное влияние на процесс эпитаксиального роста YSZ на кремниевой подложке может оказывать наличие слоя собственного окисла. Аморфный слой SiO_2 на поверхности кремния не препятствует формированию поликристаллических пленок YSZ с четко выраженной текстурой [6], однако ослабляет (исключает) взаимодействие конденсируемых час-

* Chalmers University of Technology, S-41296, Goteborg, Sweden.

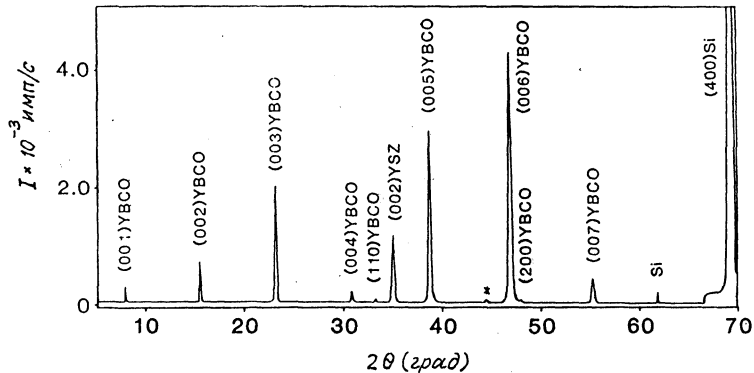


Рис. 1. Дифрактограмма (θ - 2θ) для пленочной системы $YBCO/YSZ/(100)Si$. Промежуточный слой YSZ сформирован при $T_{II}=760^\circ C$.

тиц с периодическим полем монокристаллической кремниевой подложки, что обуславливает азимутальную разориентацию кристаллитов.

Пленки YSZ и $YBCO$ приготавливались методом лазерного распыления "in situ" [7]. В качестве исходных мишеней использовались образцы $YBCO$ стехиометрического состава и таблетки YSZ ($x=0.09$), приготовленные по стандартной керамической технологии. Слои YSZ толщиной 50 нм были сформированы на поверхности кремниевых пластин при различных температурах ($T_{II}=740-800^\circ C$). Пленки $YBCO$ имели толщину 200 нм и формировались при температуре 740 G.

Подложки $(100)Si$ обрабатывались в трихлорэтилене с использованием ультразвуковой ванны, затем промывались в ацетоне и спирте. Нагрев подложек до заданной температуры конденсации промежуточного слоя осуществлялся в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ Тор, после начала распыления исходных мишеней YSZ давление кислорода в рабочей камере повышалось до $1 \cdot 10^{-4}$ Тор. Температура металлического блока, на котором с помощью серебряной пасты крепились подложки, контролировалась с использованием хромельалюмелевой термопары.

Для пленок YSZ , сформированных в указанном интервале температур, характерно наличие четко выраженной преимущественной ориентации кристаллитов, при которой $(100)YSZ // (100)Si$. На рис. 1 приведена дифрактограмма ($\theta \sim 2\theta$) для системы $YBCO/YSZ/(100)Si$, слой YSZ сконденсирован на $(100)Si$ при $T_{II}=760^\circ C$. Для получения информации об разориентации кристаллитов в плоскости подложки были получены рентгенограммы под настильным углом (см. рис. 2). Из данных, представленных на рис. 1 и 2, следует, что пленки YSZ , сформированные при указанных выше температурах конденсации, состоят из участков с азимутально разориентированной, поликристаллической фазой и областей, эпитаксиально выросших на подложке. Прогрев кремниевых подложек в ва-

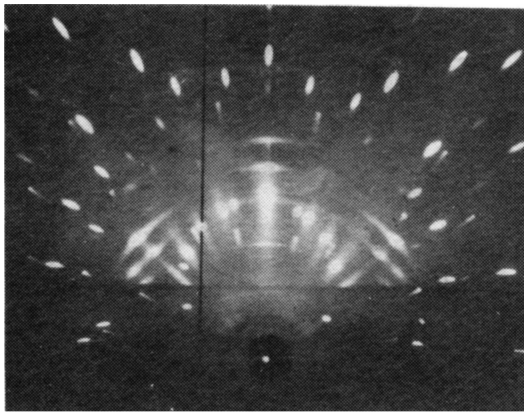


Рис. 2. Рентгенограмма, полученная под настильным углом для пленочной системы $YBCO/YSZ/(100)Si$. Слой YSZ сформирован при $T_{II} = 760$ С.

кууме при $T > 750$ С приводит [8] к освобождению отдельных участков их поверхности от слоя собственного окисла. Зародыши кристаллической фазы YSZ , сформированные на таких участках, четко ориентированы относительно выделенного направления в плоскости подложки и задают азимутальную ориентацию прилегающих к ним областей пленки. С повышением T_{II} доля азимутально разориентированной фазы в пленках YSZ уменьшалась.

Структура пленок $YBCO$ существенным образом зависела от структуры промежуточного слоя. Для пленочных систем $YBCO/YSZ/(100)Si$, промежуточный слой YSZ в которых сформирован при $T_{II} \geq 760$ С, характерно наличие четко выраженной текстуры $(001)YBCO // (h00)YSZ // (100)Si$ (см. рис. 1). Наличие на дифрактограмме рефлекса при $2\theta \sim 32.8^\circ$ указывает на присутствие в пленке $YBCO$ произвольно ориентированных кристаллитов, а появление рефлекса при $2\theta \sim 44.2^\circ$ связано, по-видимому, с формированием между пленкой $YBCO$ и слоем YSZ прослойки BZO ($BaZrO_3$) [9, 10]. Оценка параметра решетки для материала указанной прослойки приводит при расчете для отражения от плоскостей (200) кубического кристалла к величине $a = 4.086$ Å, что хорошо коррелирует с данными для сильно допированных промежуточных слоев, формирующихся на границе между $YBCO$ пленкой и монокристаллом YSZ [10]. В пленке $YBCO$ из исследованной пленочной системы $YBCO/YSZ/Si$ имелось значительное количество включений второй фазы (см. рис. 3, а) с размерами 1–3 мкм. Включения второй фазы и прилегающие к ним участки, состоящие из нитевидных и плоских дезориентированных зерен $YBCO$, располагаются по периметру блочно монокристаллических областей. Кристаллические блоки в указанных областях имеют размеры ~ 300 нм и четко ориентированы азимутально, т. е. они сформированы

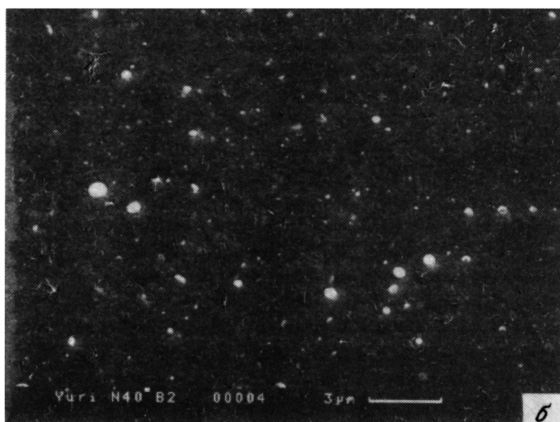
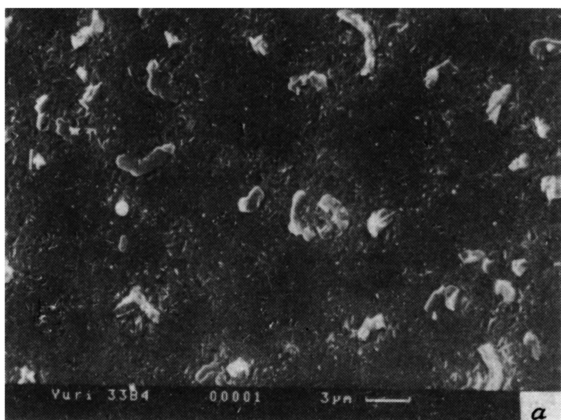


Рис. 3. Электроно-микроскопические снимки поверхности пленочных систем $YBCO/YSZ(100)Si$, промежуточный слой в которых сформирован при $T_{\Pi}=760$ С (а) и $T_{\Pi}=800$ С (б).

рованы эпитаксиально на соответствующих участках промежуточного слоя YSZ . Причиной формирования включений второй фазы и появления дезориентированных кристаллитов около них в пленках $YBCO$ является, по-видимому, наличие в промежуточном слое YSZ участков с поликристаллической азимутально разориентированной фазой. На таких участках происходит эффективная диффузия ионов бария из $YBCO$ пленки в промежуточный слой и кремния из подложки в $YBCO$ пленку. По мере совершенствования структуры промежуточного слоя YSZ происходит уменьшение концентрации и средних размеров включений второй фазы в пленках $YBCO$. На рис. 3, б приведен электронно-микроскопический снимок поверх-

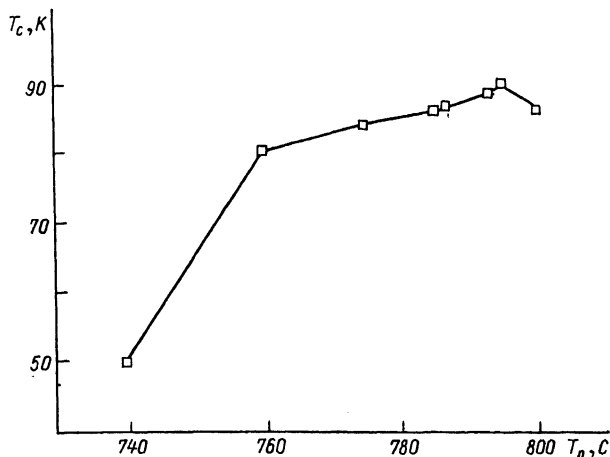


Рис. 4. Зависимость температуры сверхпроводящего перехода $T_c(r=0)$ для пленок $YBCO$ из системы $YBCO/YSZ/(100)Si$ от температуры конденсации промежуточного слоя YSZ .

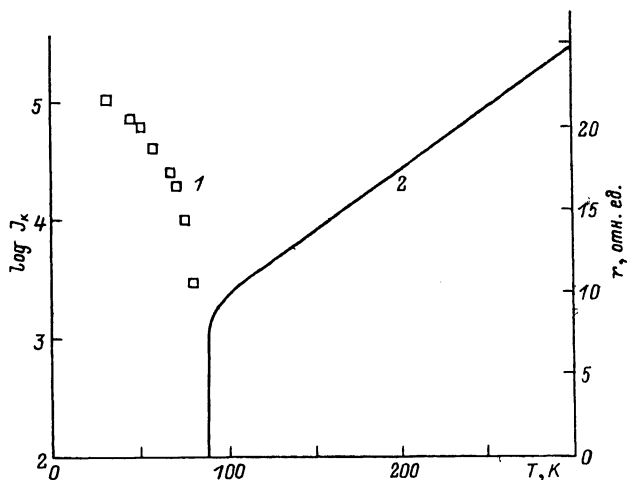


Рис. 5. Изменение с температурой плотности критического тока J_k (1) и сопротивления r (2) для пленки $YBCO$ из системы $YBCO/YSE/(100)Si$, промежуточный слой в которой сформирован при $T_{\text{II}}=790^\circ\text{C}$.

ности системы $YBCO/YSZ/Si$, промежуточный слой в которой был сформирован при $T_{II}=800$ С.

На рис. 4 приведена зависимость температуры сверхпроводящего перехода $T_C(r=0)$ для пленок $YBCO$ от температуры конденсации промежуточного слоя. Наиболее высокие значения T_C наблюдались при $T_{II} \sim 790$ С. На рис. 5 показано изменение с температурой сопротивления и плотности критического тока для пленки $YBCO$, промежуточный слой YSZ для которой был сформирован при $T_{II}=790$ С. Измерение плотности критического тока в пленках $YBCO$ проводилось на мостиках шириной 3 мкм, длиной 20 мкм, сформированных с использованием ионного травления. Снижение плотности критического тока в исследованных пленках $YBCO$ по сравнению с пленками, эпитаксиально выращенными на поверхности $YSZ(100)Si$ [11], обусловлены как несовершенством структуры промежуточного слоя YSZ , так и действующими в ВТСП пленке упругими напряжениями. Одной из причин упруго напряженного состояния исследованных пленок $YBCO$ является значительное различие температурных коэффициентов линейного расширения $YBCO$ и Si . Как следует из данных, представленных на рис. 2, для областей $YBCO$ пленки, эпитаксиально выращенных на поверхности промежуточного слоя, характерен значительный астеризм. Высокий уровень напряжений обуславливает формирование в пленке системы микротрещин, отдельные из них видны на рис. 3, а.

Проведенное исследование структуры и свойств пленочных систем $YBCO/YSZ/Si$ показало, что параметры $YBCO$ пленок резко зависят от структуры промежуточного слоя. Наличие слоя собственного окисла на поверхности кремниевой подложки нарушает эпитаксиальный рост пленок YSZ . На фрагментах поверхности Si , освобожденных от SiO_2 , при $T_{II} \sim 800$ С формируются четко азимутально ориентированные кристаллические зародыши YSZ , которые задают ориентацию прилегающих к ним областей промежуточного слоя. Промежуточные слои YSZ с незначительной долей разориентированной поликристаллической фазы позволяют значительно снизить химическое взаимодействие между $YBCO$ пленкой и кремниевой подложкой.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Cheung C.T., Ruckenstein E. // J. Mater. Res. 1989. V. 4. N 1. P. 1-15.
- [2] Luo L., Wu D., Dye R.C., Muenchhausen R.E., Fortyn S.R., Coulter Y., Maggiore C.J., Inoue T. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 16. P. 2043-2045.
- [3] Fork D.K., Ponce F.A., Tramontana J.C., Geballe T.H. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 7. P. 2294-2297.

- [4] M a y r e n H., N i s h i a m a Y., M i y a -
m o t o N., K a y Y., Y a m a n a k a Y.,
O s a k a Y., N i s h i y a m a F. // Jap. J.
Appl. Phys. 1990. V. 29. P. L955-L958.
- [5] F e n n e r D.B., V i a n o A.M., F o r k D.K.,
C o n n e l l G.A.N., B o y c e J.B., P o n -
c e F.A., T r a m o n t a n a J.C. // J. Appl.
Phys. 1991. V. 69. N. 4. P. 2176-2182.
- [6] S t a m p e r A.K., G r e v e D.W., S c h l e -
s i n g e r T.E. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70.
N. 4. P. 2046-2051.
- [7] B r o r s s o n G., I v a n o v Z., N i l s -
s o n P.-A. // Science and Technology of Thin
Film Superconductors 2 / Ed. by R.D. McConnel
and R. Noufi (Plenum, New York, 1990). P. 169.
- [8] B e n y a i c h F., P r i o l o F., R i m i -
n i E., S p i n e l l a C., W a r d P. // J. Appl.
Phys. 1992. V. 71. N. 2. P. 638-646.
- [9] B o i k o v Yu.A., I v a n o v Z.G., O l s -
s o n E., A l a r c o J.A., B r o r s s o n G.,
C l a e s o n T. // J. Appl. Phys. 1992. To be
published.
- [10] H w a n g D.M., Y i n g Q.Y., K w o k H.S. //
Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N. 21. P. 2429-2431
- [11] F o r k D.K., P o n c e F.A., T r a m o n t a -
n a J.C., N e w m a n N., P h i l i p s J.M.,
G e b a l l e T.H. // Appl. Phys. Lett. 1991.
V. 58. N 21. P. 2432-2434.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН,
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
14 сентября 1992 г.