

05.4;09;11;12

©1994

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ НА САПФИРЕ ДЛЯ СВЧ ПРИМЕНЕНИЯ

*Р.К.Белов, А.В.Варганов, Б.А.Володин, А.К.Воробьев,
С.В.Гапонов, Ю.Н.Дроздов, Е.Б.Клюенков, К.В.Морозов,
С.А.Павлов, А.Е.Парафин, В.В.Таланов*

1. В последнее время появился ряд работ, посвященных исследованию свойств ВТСП пленок $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) на подложках из сапфира Al_2O_3 (AlO) с буферными подслоями [1-5]. Интерес к эпитаксиальным ВТСП пленкам на сапфире обусловлен рядом его особенностей по сравнению с другими диэлектрическими подложками. Во-первых, при азотно-гелиевых температурах монокристаллический сапфир обладает на СВЧ низким тангенсом угла диэлектрических потерь $tg \delta \approx 10^{-4} - 10^{-8}$ [6,7]. Во-вторых, технология изготовления подложек из сапфира чрезвычайно хорошо развита и позволяет получать подложки большого размера. Кроме того, сапфир имеет необходимую для использования в СВЧ технике диэлектрическую проницаемость $\epsilon \approx 10$ [8]. Эти свойства сапфира делают ВТСП пленки на его основе весьма интересным и перспективным объектом исследований в области СВЧ. В то же время одной из актуальных задач эпитаксиального роста пленок ВТСП является исследование влияния параметров технологического процесса на СВЧ сопротивление образцов. Как известно, важнейшим из

этих параметров является температура подложки в процессе осаждения пленки.

В настоящей работе получены зависимости поверхностного СВЧ сопротивления тонких пленок YBCO на подложках YSZ/AlO от температуры осаждения T_d при магнетронном и лазерном методах напыления. Образцы имели следующие характеристики: толщина пленок YBCO 140 при магнетронном и 200 нм при лазерном методах напыления; критические температуры — 85–92 К; разориентация оси "с" около 1° . Лучшие образцы при температуре 77 К имели величину эффективного (измеренного) поверхностного сопротивления меньше 0.8 мОм на частоте 10 ГГц и плотность критического тока около $2 \cdot 10^6$ А/см².

2. При изготовлении подложек буферный подслой YSZ толщиной 100 нм получался методом электронно-лучевого испарения. Подслои YSZ напылялись при давлении 2×10^{-2} Па и температуре подложки 750°C со скоростью 6 нм/мин. Рентгеновская дифракция (ДРОН-4) показала высокую монокристалличность буферных подслоев. Эпитаксиальные соотношения с подложкой: (001)YSZ II (10 $\bar{1}$ 2); (100)YSZ II (0100) AlO. Ширина кривой качания отражения (002) на половине высоты составила для исследованных образцов от 0.4 до 0.6°, что практически исключило влияние разброса параметров подложек на полученные зависимости.

При магнетронном напылении пленки YBCO получали в низкотемпературном одностадийном процессе "in situ" при обратном распылении на постоянном токе. Конструкция и особенности работы инверсной магнетронной распылительной системы описаны в [9]. Такая система позволяет обеспечить высокую воспроизводимость условий напыления, что в данном случае дает возможность изучать зависимость различных свойств пленок от T_d . В настоящей работе кольцевая стехиометрическая мишень YBCO диаметром 85 мм распылялась в смеси аргона и кислорода в соотношении Ar:O₂ = 1:1 при давлении 50 Па. При напряжении на разрядном промежутке 140 В и разрядном токе 1.2 А скорость осаждения пленок составила 0.8 нм/мин. Температура в зоне нагрева подложки измерялась и поддерживалась с точностью $\pm 4^\circ\text{C}$ в диапазоне 600 – 750°C.

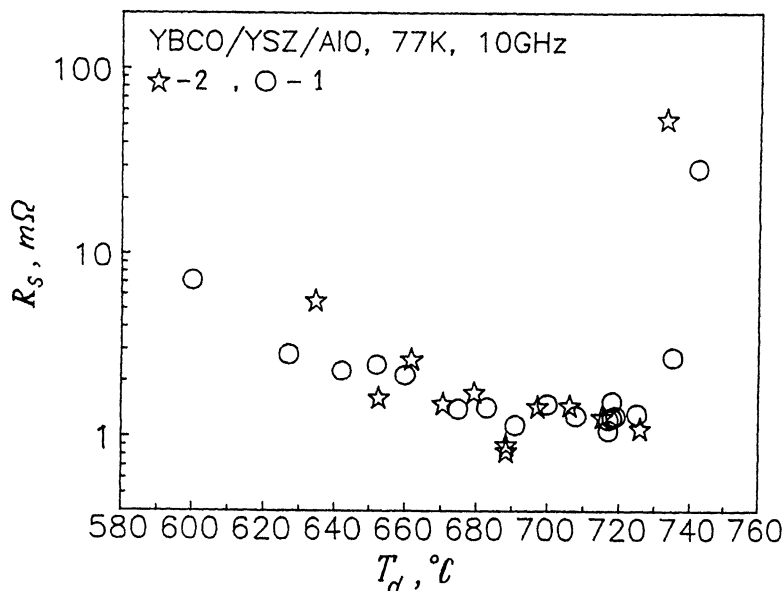
При лазерном напылении пленки получались распылением стехиометрической мишени YBCO излучением эксимерного лазера. Лазер работает на смеси KrF, длина волны 248 нм, длительность импульса 34 нс. Распыление мишени производилось в атмосфере кислорода при давлении около 20 Па. Плотность лазерного излучения 15 Дж/см², частота повторения импульсов 10 Гц. Расстояние мишень-

подложка 60 мм. Нагрев подложки осуществлялся ИК излучением. Температура подложки контролировалась с помощью термопары и поддерживалась с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Пленки выращивались в диапазоне температур осаждения $600 - 750^\circ\text{C}$. Скорость роста при указанных условиях составляла 0.06 нм/импульс.

Поверхностное эффективное СВЧ сопротивление пленок R_s измерялось методом резонатора с параллельными пластинами ^[10] с модифицированной системой связи подводящих линий с резонатором ^[11]. Измерения проводились при температуре жидкого азота 77 К. В процессе измерений одной из пластин резонатора служила исследуемая пленка на сапфире, а другой — тестовая пленка YBCO на подложке LaAlO_3 с величиной эффективного поверхностного сопротивления 0.6 мОм (77 К, 10 ГГц). Это позволило получить высокую относительную точность измерений. В качестве диэлектрической прокладки резонатора при исследовании образцов с R_s меньше 5 мОм использовался тефлон толщиной 10 мкм. При измерении больших значений R_s применялся тефлон толщиной 25 и 40 мкм. Эффективное поверхностное сопротивление рассчитывалось по измеренному значению добротности резонатора ^[10] в пренебрежении радиационными потерями. Исследованные образцы имели размеры $12.5 \cdot 12.5 \text{ мм}^2$. R_s каждого образца измерялось на модах резонатора TEM_{01} и TEM_{10} (т. е. при протекании СВЧ тока в двух перпендикулярных гранях образца направлениях), и в качестве конечного результата бралось среднее значение. Резонансные частоты в процессе измерений имели некоторый разброс около величины 9 ГГц, и полученные значения поверхностного сопротивления пересчитывались по ω^2 -закону на частоту 10 ГГц.

3. На рисунке приведены зависимости поверхностного эффективного сопротивления R_s пленок YBCO (77 К, 10 ГГц) от температуры осаждения T_d при магнетронном (Magnetron Sputtering) и лазерном (Pulse Laser Deposition — PLD) методах напыления. Графики совмещены по характерной точке начала резкого возрастания R_s при больших T_d . Приведенные на графике значения T_d соответствуют магнетронному процессу напыления. Оказалось, что при обоих методах ширина оптимального интервала температур осаждения, с точки зрения минимизации R_s , одинакова.

На графиках наблюдаются три характерные области изменения R_s , что позволяет предположить наличие двух различных механизмов влияния температуры осаждения на величину R_s . При низких значениях T_d плавное уменьшение R_s обусловлено, по-видимому, улучшением параметров кристаллической структуры образцов с ростом T_d ^[12]. При вы-



Зависимости поверхностного эффективного сопротивления пленок $Y_1Ba_2Cu_3O_7/YSZ/Al_2O_3$ (77 К, 10 ГГц) от температуры осаждения при магнетронном (1) и лазерном (2) методах напыления.

соких температурах осаждения резкий рост величины R_s можно связать с изменением фазового и стехиометрического состава образцов и возрастанием количества несверхпроводящей фазы [13,14]. В интервале температур от 670 до 720°C эти два механизма, вероятно, компенсируют друг друга, и в результате величина R_s остается постоянной. В следующих работах с целью проверки данной гипотезы будет более детально обсуждаться связь между электрофизическими параметрами пленок ВТСП и их фазовым составом, стехиометрией и кристаллографическими параметрами. С точки зрения минимизации резистивных СВЧ потерь, в образцах особого внимания заслуживает, очевидно, изучение причин резкого возрастания величины R_s при высоких T_d .

4. В работе получены зависимости поверхностного СВЧ сопротивления тонких пленок YBCO на подложках из сапфира с YSZ буферным подслоем от температуры осаждения пленок при магнетронном и лазерном напылении. Показано, что при обоих методах ширина оптимального интервала температур осаждения, с точки зрения получения пленок с наименьшим R_s , одинакова и имеет ширину около 50°C. Обсуждается наличие двух механизмов влияния температуры осаждения на величину поверхностного сопротивления образцов.

Авторы выражают благодарность Ю.Н.Ноздрину и А.Ю.Климову за плодотворные обсуждения в процессе работы.

Работа выполнена в рамках государственной программы по ВТСП проект № 92140 "Подслой" и при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 9302-3362.

Список литературы

- [1] *Char C., Newman N. et al. // Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. N 4. P. 409.
- [2] *Gao J., Clopman B.B.G. et al. // J. Appl. Phys.* 1992. V. 71. N 5. P. 2333.
- [3] *Hensen S., Lenkens M. et al. // Proc. of 50th German-CIS Bilateral Seminar on High-Temperature Superconductivity.* Kloster Banz, October 5-9. 1992. P. 133.
- [4] *Copetti C.A., Soltner H. et al. // Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. N 10. P. 1429.
- [5] *Maul M., Schulte B. et al. // J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. N 4. P. 2942.
- [6] *Брагинский В.Б., Багдасаров Х.С. и др. // Письма в ЖТФ.* 1985. Т. 11. В. 7. С. 427.
- [7] *Brown R., Pendric V. et al. // Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. N 13. P. 1351.
- [8] *Jiang G.O., Wong W.H. et al. // Rev. Sci. Instrum.* 1993. V. 64. N 6. P. 1614.
- [9] *Воробьев А.К., Клюенков Е.Б. и др. // Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 19. В. 15. С. 12.
- [10] *Taber R.C. // Rev. Sci. Instrum.* 1991. V. 61. P. 2200.
- [11] *Basovich A.Ya., Belov R.K. et al. // Journ. of Superconductivity.* 1992. V. 5. N 6. P. 497.
- [12] *Michicanmi O., Aano H. et al. // Rev. of Electric. Communic. Lab.* 1988. V. 36. N 6. P. 579.
- [13] *Rauch W., Behner H. et al. // Physica C.* 1992. V. 198. P. 389.
- [14] *Selinder T.I., Han Z. et al. // Proc. of the ICAM-91 of the E-MRS meeting, May 27-31, Strassburg.* 1991.

Институт физики микроструктур
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию
17 марта 1994 г.