

будет наиболее сильной в окрестности точки максимума функции $\gamma_\alpha(\tau)$. Поскольку обычно в каналах по мере приближения к входу и выходу $\partial[\rho_{0\alpha} + H_{0\alpha}^2/2] / \partial \tau$, неоднородность располагается во внутренней части канала. Согласно (11), при $\beta \ll 1$ неоднородность „привязана“ к точке перегиба профиля $H_{0\alpha}(\tau)$.

Возможность анализа различных режимов потока на основе использования фактора γ_α рассматривается в [3].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Брушлинский К.В., Морозов А.И. // Вопросы теории плазмы. В. 8. М.: Атомиздат, 1974. С. 88-163.
- [2] Алексеева Л.М. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6, В. 21. С. 1310-1312.
- [3] Алексеева Л.М. Течения плазмы при наличии эффекта Холла. Препринт НИИЯФ МГУ № 88-38/59, М., 1988. 42 с.

Поступило в Редакцию
25 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10

26 мая 1989 г.

05.4; 11

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛЕНОК $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ ОТ УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Ю.А. Бойков, В.А. Данилов,
Ш.М. Дугужев, Т.Б. Жукова

Свежеосажденные пленки $Bi-Sr-Ca-Cu-O$, приготовленные методом лазерного распыления в вакууме, не обладают, как правило, свойствами сверхпроводимости ($T > 4.2$ К), что связано с частичной потерей кислорода сконденсированным материалом и аморфностью его структуры [1, 2]. Для рекристаллизации и насыщения конденсатов кислородом, их подвергают высокотемпературному отжигу в атмосфере кислорода или воздуха. От условий термообработки в значительной степени зависят основные параметры пленок $Bi-Sr-Ca-Cu-O$.

В работе исследована зависимость электропроводности σ пленок $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ от температуры T_0 и длительности t_0 термообработки.

Пленки $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ были получены путем распыления исходной мишени с составом (2212) с помощью лазера ГОР-100М в вакууме $1 \cdot 10^{-6}$ Тор [3]. Были исследованы пленки с толщинами $d = 2000-5000$ Å. В качестве подложек использовались сколы (100) MgO , температура подложек при конденсации поддерживалась в интервале 570-600 К.

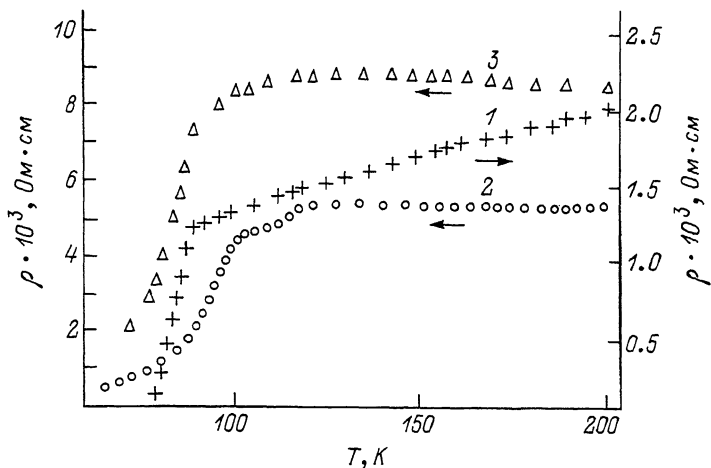


Рис. 1. Зависимость электросопротивления ρ от температуры для пленок $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$, подвергнутых термообработке в атмосфере воздуха при различных температурах T_0 . 1 - $T_0 = 1110$ К, 2 - $T_0 = 1140$ К, 3 - $T_0 = 1020$ К.

Свежеприготовленные пленки имели аморфную структуру, обладали высоким удельным электросопротивлением $\rho = 5 \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см.

Термообработка пленок проводилась в воздушной атмосфере при температурах 970–1170 К.

Наиболее низкие значения $\rho(300$ К) и наиболее высокие значения отношений $\rho(300$ К)/ $\rho(100$ К) были получены на пленках, подвергнутых термообработке в течение 2 часов при $T_0 = 1100$ –1110 К.

На рис. 1 показана температурная зависимость электросопротивления пленки $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ ($d = 5000$ Å) после термообработки при $T = 1110$ К. Как следует из приведенных данных, сверхпроводящий переход имеет место при $T_{c1/2} = 85$ К, ширина перехода $\Delta T_c = 9$ К, нулевое электросопротивление наблюдается при 79 К. Рентгеноструктурное исследование пленок, термообработанных при $T = 1110$ К, показало, что они являются поликристаллическими, средние размеры кристаллитов имеют значения 2–6 мкм. Основной в пленках является фаза Маэдо [4], $c = 30.84$ Å состав $Bi_{2.15}(Sr_{1.68}Ca_{0.32})Ca_{1.17}Cu_2O_y$. Наблюдалась четко выраженная текстура (00L). Наряду с фазой Маэдо в пленках присутствовала фаза с $c = 24.66$ Å и составом $Bi_2Sr_2CuO_6$.

При уменьшении температуры термообработки в интервале 1110–1070 К относительный объем фазы с $c = 30.84$ Å в пленках уменьшался, при этом ΔT_c возрастала за счет затянутой низкотемпературной части на зависимости $\rho(T)$ и достигала 18 К при неизменной плотности измерительного тока. При $T_0 = 1020$ К в пленках имелись лишь отдельные включения фазы с $c = 30.84$ Å, изменения электросопротивления с температурой в таких пленках показано на рис. 1.



Рис. 2. а) Оптический снимок поверхности пленки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$: подвергнутой термообработке в атмосфере воздуха при $T = 1140 \text{ K}$ в течение 30 мин ($\times 1500$). б) Снимок в характеристических лучах $\text{BiL}\alpha$ участка ($200 \times 200 \text{ мкм}$) пленки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ после термообработки при $T_0 = 1140 \text{ K}$ в течение 120 мин.

Как отмечалось в [5], при составе, близком к (2223), в соединениях Bi-Sr-Ca-Cu-O может образовываться фаза с $T_C \approx 105-110 \text{ K}$, причем формированию фазы с высокой температурой перехода способствует увеличение температуры термообработки. Поскольку в оксидах Bi-Sr-Ca-Cu наиболее легколетучими компонентами являются Bi и Sr [6], высокотемпературная термообработка пленок в атмосфере воздуха должна приводить к увеличению относительной концентрации кальция и меди.

На рис. 1 показано изменение с температурой электросопротивления пленки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$, подвергнутой термообработке в течение 2 часов при 1140 K . Появление особенности на зависимости $\rho(T)$ при $110-115 \text{ K}$ указывает на образование в пленке микровключений фазы с высоким T_C . На дифрактограммах, полученных с пленок, подвергнутых высокотемпературной термообработке, имеются слабые дополнительные пики, которые могут принадлежать фазе, для которой $c \approx 37 \text{ \AA}$.

После высокотемпературной термообработки в пленках появились нитевидные включения еще одной фазы, которая образуется сначала на свободной поверхности. На рис. 2,а показан оптический снимок

поверхности пленки $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ после термообработки при $T_0 = 1140$ К в течение 30 мин. При возрастании времени термообработки объем включений увеличивался как за счет их расширения, так и большого проникновения в объем пленки. Указанная фаза обладает ромбической структурой с $c = 16.32$ Å, $a = 3.54$ Å, $b = 3.91$ Å, состав ее может быть представлен в виде $(Sr_{0.65}Ca_{0.35})CuO_3$. Состав и структура обнаруженной фазы отличны от соответствующих данных для идентифицированных в [7] свободных от висмута фаз, которые образовались при формировании керамических образцов на основе оксидов $Bi-Sr-Ca-Cu$. На рис. 2,б показан снимок участка пленки, содержащего включение фазы с $c = 16.32$ Å, полученный в характеристических лучах BiL_{α} . Образование фазы с $c = 16.32$ Å можно связать с активным реиспарением Bi из пленки $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ при температурах, близких к температуре плавления данного материала.

В процессе высокотемпературной термообработки поликристаллических пленок многокомпонентных соединений легколетучим компонентом обедняется не только слой у свободной поверхности, но и области в объеме пленки, прилегающие к границам кристаллитов [8]. Ухудшение контакта между кристаллическими зернами вследствие реиспарения Bi из межкристаллитных прослоек в пленках $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ приводит к росту абсолютных значений ρ при $T > T_c$ и к уменьшению величины критического тока при $T < T_c$. Нулевое электросопротивление, как это следует из данных, представленных на рис. 1, достигается при $T < 64$ К.

Проведенное исследование показало, что поведение электросопротивления пленок $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ существенным образом зависит от условий термообработки, в процессе которой могут изменяться относительные концентрации различных кристаллических фаз, существующих в их объеме.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K a n a i M., K a w a i T., K a w a i M., K a w a i S. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 7. P L1293-L1296.
- [2] K o m u r o S., A o y a g i Y., M o r i k a w a T., N a m b a S. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 1. P. L34-36.
- [3] Б о й к о в Ю.А., В о л к о в М.П., Д а н и л о в В.А., М е л е х Б.Т., Ф и л и н Ю.Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 5.
- [4] M a e d a H., T a n a k a Y., F u k u t o m i M., A s a n o T. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 2. P. L209-210.
- [5] Y o s h i t a k e T., S a t o n T., K u b o Y., Y g a r a s h i H. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 6. P. L1089-1091.
- [6] К и к о и н И.К. Справочник "Таблицы физических величин." М.: Атомиздат, 1976, с. 201.

- [7] W a s u Y.A., X u e Y.Y., H u a n g Z.J., G a o L., B e s h o l d J., C h u C.W. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 12. P.1174-1177.
- [8] Б о й к о в Ю.А., К у т а с о в В.А. // ФТТ, 1987. Т. 29. № 5. С. 1604-1606.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
1 марта 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 10

26 мая 1989 г.

01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ПЕРЕНОСА КАУСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

С.Н. В л а с о в, М.А. Ш а п и р о

Как известно, в приближении геометрической оптики асимптотическому представлению собственной волны в ограниченной области соответствует система лучей, образующих каустику [1, 2]. Поэтому преобразование типов волн можно производить с помощью зеркальных трансформаторов, преобразующих системы лучей [3-5]. В данной заметке мы рассмотрим преобразование и перенос двумерных полей, определяемых лучевыми структурами в плоскости. При этом ограничимся исследованием трансформации простейших структур в виде систем лучей, выходящих из фокуса, либо соскальзывающих с каустики-окружности по касательным к ней.

Перенос каустики и изменение ее радиуса производится с помощью зеркальной поверхности, которая переводит лучи, касающиеся одной окружности, в лучи, касающиеся другой окружности. В двумерном случае указанным свойством обладают кривые, относящиеся к семейству биэвольвент.

Биэвольвентой к выпуклой кривой L [1] называется кривая, которая характеризуется постоянной для всех ее точек длиной замкнутой линии, складывающейся из отрезков касательных к L и участка кривой L между точками касания. Как показано в [1], зеркало в виде биэвольвенты к L обеспечивает существование каустики в виде кривой L . В случае эллиптической каустики биэвольвентой является эллипс с теми же фокусами.

Рассмотрим преобразование каустики-окружности радиуса α_1 в каустику-окружность радиуса α_2 при расстоянии $2F$ между их центрами. Искомая кривая описывается дифференциальным уравнением, представляющим собой условие равенства углов между касательными к каустикам (лучами) и касательной к кривой. В полярных