

Магнитосопротивление тонких пленок ВТСП материала системы Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O

Л.П. Ичкигидзе

Московский государственный институт электронной техники (Технический университет), 12449, Москва, Россия

Исследовано магнитосопротивление тонких пленок ($d \sim 0.05-0.065 \mu\text{m}$) высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) материала состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в магнитном поле $B < 5 \text{ mT}$ при температуре $T = 77 \text{ K}$. Установлено, что максимальное значение относительного магнитосопротивления $\delta R \sim 15 \%$ достигается в пленках на подложке MgO при $B = 1 \text{ mT}$ и плотности транспортного тока $J \sim 10^2 \text{ A/cm}^2$. В параллельном направлении B относительно поверхности пленки величина δR приблизительно на два порядка меньше, чем в перпендикулярном направлении.

В сверхпроводниках второго рода (массивные и пленочные образцы) с идеальными характеристиками движения магнитных вихрей Абрикосова имеется небольшое магнитосопротивление, которое в реальных жестких сверхпроводниках дополнительно уменьшается. Ситуация резко меняется в ВТСП материале. Массивный керамический ВТСП материал состоит из гранул, между границами которых возникают джозефсоновские переходы. Для такой «джозефсоновской среды» очень существенно меняется сопротивление в зависимости от слабого внешнего магнитного поля B , в результате чего магнитосопротивление достигает высоких значений. Относительное магнитосопротивление, определенное как $\delta R = (R - R_0)/R$ (где R - сопротивление при $B \neq 0$, R_0 - сопротивление при $B = 0$), в ВТСП керамическом материале $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ при температуре $T = 77 \text{ K}$ и при $B = 1 \text{ mT}$ может превосходить $10^4 \%$ [1].

В настоящей работе исследуется поведение относительного магнитосопротивления в пленках ВТСП материала состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ при $T = 77 \text{ K}$, имеющих толщину $d \sim 0.05-0.065 \mu\text{m}$. Тонкие пленки, полупрозрачные, серые, готовились методом высокочастотного магнетронного напыления на диэлектрических подложках из оксида магния (MgO) $\langle 100 \rangle$ и титаната стронция (SrTiO_3) $\langle 100 \rangle$. Образцам придавалась форма полосы длиной $\sim (6-10) \text{ mm}$ и шириной $\sim (2-3) \text{ mm}$. Для формирования требуемой кристаллической структуры пленки отжигались в окислительной атмосфере при температуре 860°C в течение нескольких десятков часов. Измерения проводили четырёхзондовым резистивным методом. Во всех измерениях поле B было направлено перпендикулярно направлению транспортного тока I . Угол θ между направлениями B и I менялся с точностью $\pm 0.5^\circ$.

Типичное изменение сопротивления R от B при различных I для пленки $d \sim 0.05 \mu\text{m}$ на подложке SrTiO_3 показано на рис.1. Видно, что монотонно увеличиваются R и магнитосопротивление δR с ростом B , наклон

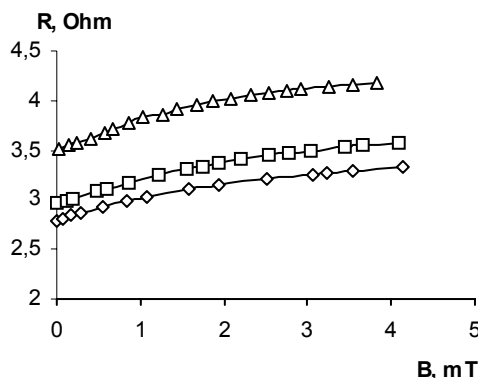


Рис.1. Зависимость $R(B)$ для пленки $d \sim 0.05 \mu\text{m}$ на подложке SrTiO_3 при различных значениях I , μA : \diamond - 37; \square - 210; Δ - 512.

dR/dB и δR не существенно меняется от I . Для данной пленки время отжига составляло $\tau \sim 40 \text{ h}$ и получено $\delta R \sim 7 \%$ при $B = 1 \text{ mT}$, $J \sim 10 \text{ A/cm}^2$. Максимальное $\delta R \sim 15 \%$ реализовалось в пленке толщиной $\sim 0.065 \mu\text{m}$ на подложке MgO при $\tau = 80 \text{ h}$, $B = 1 \text{ mT}$, $J \sim 10^2 \text{ A/cm}^2$. Для этой пленки зависимости δR от B при различных I приведены на рис.2.

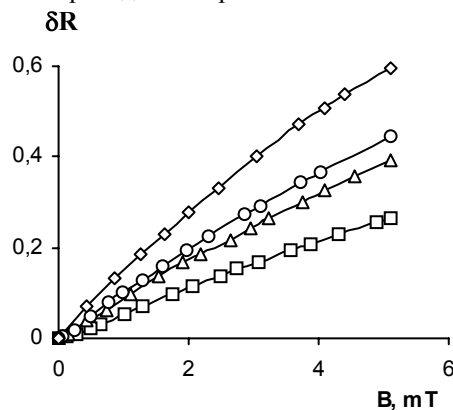


Рис.2. Зависимость δR для пленки $d \sim 0.065 \mu\text{m}$ на подложке MgO при различных значениях I , μA : \diamond - 99; \circ - 500; Δ - 1009; \square - 2025.

Видно, что отношение величин $\delta R/B$ монотонно увеличивается с уменьшением B и I . Поскольку с увеличением $\delta R/B$ увеличивается ее погрешность ($\geq 50 \%$) при $B \leq 0.2 \text{ mT}$ и $J \leq 10 \text{ A/cm}^2$, поэтому δR и $\delta R/B$ определялось таким образом, что минимальное остаточное сопротивление R_0 при $B = 0$ соответствовало напряженности электрического поля на образце $\geq 100 \mu\text{V/cm}$.

Для всех пленок изменение R от θ происходит подобным образом: зависимость $R(\theta)$ имеет период 180° , и отношение $R(\theta=0)/R(\theta=90^\circ)$ с ростом B увеличивается. При $\theta=0$ (перпендикулярное расположение поверхности пленки относительно направления B) магнитосопротивление более чем на два порядка больше, чем при $\theta=90^\circ$ в полях $B \leq 3$ мТ. Типичная зависимость R от B для пленки $d \sim 0.06$ μm на подложке MgO представлена на рис.3.

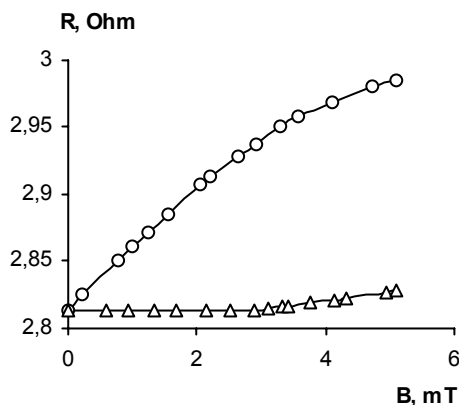


Рис.3. Зависимость $R(B)$ для пленки $d \sim 0.06$ μm на подложке MgO при $I=194$ μA и при различных значениях θ : \circ - 0° ; Δ - 90° .

Практическое отсутствие магнитосопротивления в полях $B \leq 3$ мТ при параллельном расположении поверхности пленки и направлении B возможно является следствием того, что в данных пленках оценочное первое критическое магнитное (H_{c1}) превосходит 10 мТ. Следовательно, свободное проникновение магнитного потока внутрь пленки через ее поверхность не происходит, и поэтому $\delta R \approx 0$.

Электронно-микроскопические исследования показали, что пленки имеют текстурированную структуру: гранулы имеют форму пластинок и расположены параллельно относительно поверхности подложки, т.е. параллельно направлению оси c . Полученные микроструктурные исследования полностью совпадают с результатами работы [2].

Высокие значения относительного магнитосопротивления ((7-15) % при $B=1$ мТ) в исследованных тонких пленках и массивных образцах ($\sim 10^4$ % при $B=1$ мТ), могут быть вызваны двумя механизмами: существованием джозефсоновских контактов между границами гранул и существованием джозефсоновских контактов между плоскостями CuO в ВТСП материале. По-видимому, более существенный вклад в δR дает первый механизм в массивных керамических образцах [1,3], и толстых пленках ($d \sim 280$ μm) [4], ($d \sim 2$ μm) [5]; второй механизм, возможно, реализуется в тонких пленках состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ изученных в настоящей работе. Действительно, сравнения характеристик пленок исследованных нами и другими авторами, которые получили высокое значение относительного магнитосопротивления, свидетельствуют о различных механизмах магнитосопротивления в них. Например, наши пленки при

$T=77$ К имели малое остаточное удельное сопротивление ~ 10 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ и высокие значения плотности критического тока ≥ 0.1 A/cm^2 , а пленки, исследованные в [4,5], имели ориентировочно ≥ 100 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ и ≤ 0.1 A/cm^2 , соответственно.

Полученное нами значение относительного магнитосопротивления $\delta R \sim 15$ % при $B=1$ мТ практически совпадает со значением $\delta R \sim 17$ % для толстой ($d \sim 280$ μm) пленки системы Y-Ba-Cu-O [4], и превосходит $\delta R \sim 12$ %, полученное для материалов с колоссальным магнитосопротивлением при температуре кипения жидкого азота [6]. Следовательно, текстурированные тонкие ($d \sim 0.05$ - 0.065 μm) пленки высокотемпературного сверхпроводящего материала состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ на подложке MgO имеют хорошую перспективу для использования их в качестве функционального материала в разработках различных приборов и датчиков криоэлектроники. Например, в работе [5] было использовано высокое магнитосопротивление пленок ($d \sim 2$ μm) ВТСП материала системы Bi-Sr-Ca-Cu-O для создания датчика слабого магнитного поля с разрешением ≤ 1 нТ. В работе [7] показано, что датчик реализует разрешение ≤ 0.1 пТ при совместном использовании пленок с гигантским магнитосопротивлением ($\delta R \sim 2$ % при $B=1$ мТ) и высокотемпературного сверхпроводящего материала системы Y-Ba-Cu-O (трансформатор потока).

Таким образом, относительное магнитное сопротивление тонких пленок ($d \sim 0.05$ - 0.065 μm) ВТСП материала состава $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ при $T=77$ К достигает значение $\sim (7-15)$ % при $B=1$ мТ, оно зависит от угла θ между направлениями B и I , и от их значения. Они могут быть использованы в разработках полярного датчика слабого магнитного поля, а пленки, изученные в [4,5], пригодны для создания униполярных датчиков слабого магнитного поля.

Автор весьма признателен Мингазину В.Т. за пригласительные пленки и коллективу НИЛ СПМЭ МГИЭТ за поддержку данной работы. Работа выполнена в рамках гранта Т02.-02.3-3048 Министерства образования РФ.

1. Y. E. Grigorashvily, L. P. Ichkitidze. 10 th IWCC, Gottingen, Germany, 308 (2001).
2. Y.E. Grigorashvily, S.I. Volkov, I.L. Sotnikov et al. Supercond.Sci.Technol., 12, 270 (1999).
3. D.A Balaev, K.A.Shaihutdinov, S.I. Popkov et al. Supercond. Sci. Technol.,17,175 (2004).
4. M.Itoh, M. Ishidoh.,K. Mori K. et al. IEEE Transac. Appl. Superconductivity.,9,3085 (1999).
5. K. Tsukamoto, H. Shimojima, M.Ishii et al. Jap. Jour. Appl. Phys.,30, L686 (1991).
6. T. Venkatesan and R.P. Sharma. Materials Science and Engineering.,B41, 30 (1996).
7. M.Pannetier, C. Fermon, Le Goff G. et al. Science.,304, 1648 (2004).