

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И КРИТИЧЕСКИЙ ТОК СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($R = \text{Y}, \text{Eu}, \text{Ho}$)

Л.З.Авдеев¹⁾, А.В.Волкозуб¹⁾, А.И.Головашкин, Е.В.Екимов,
С.И.Красносвободцев, К.К.Лихарев¹⁾, Е.В.Печень,
О.В.Снигирев¹⁾, В.В.Ханин¹⁾

Температурные зависимости критической плотности тока монокристаллических пленок высокотемпературных сверхпроводников изучены параллельно бесконтактным (магнитным) и контактными методами. Показано, что в магнитных полях до 10^2 Э, ориентированных перпендикулярно плоскости пленки, хорошо выполняется модель Бина.

Электродинамические свойства высокотемпературных сверхпроводников представляют большой интерес как с общенаучной, так и прикладной точек зрения. Ранее уже было продемонстрировано, что весьма удобными для изучения этих свойств являются бесконтактные магнитные методы. Так, например, измеряя температурные и полевые зависимости магнитного момента M объемных монокристаллов¹ и образцов тонких пленок²⁻⁴, удается не только определить температуру перехода T_c в сверхпроводящее состояние, но и количественно измерить температурные зависимости плотности их критического тока j_c . Однако при сравнении этих данных с полученными путем контактных (электрических) измерений были отмечены некоторые расхождения^{2,4}. Целью настоящей работы являлось изучение магнитных свойств тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($R = \text{Y}, \text{Ho}, \text{Eu}$) и сравнение значений j_c и T_c , полученных для одних и тех же образцов бесконтактным методом и прямыми контактными электрическими измерениями.

Монокристаллические пленки составов, близких к $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($R = \text{Y}, \text{Eu}, \text{Ho}; \delta \lesssim 0,5$) и толщиной d от 0,15 до 1 мкм с ориентацией оси c перпендикулярно плоскости монокристаллической подложки SrTiO_3 изготавливались импульсным лазерным распылением керамических мишеней стехиометрического состава по методике, описанной в работе⁵. Часть образца с участком пленки в форме квадрата со стороной $D \approx 1$ мм наклеивалась на кварцевую нить и помещалась в ампулу универсального сквид-магнитометра⁶, в котором для получения большого динамического диапазона (≈ 130 дБ) использовался аналого-цифровой режим работы электроники сквида. Магнитный момент пленки измерялся при медленном отогреве образца в постоянном магнитном поле H , перпендикулярном ее плоскости, после охлаждения пленки до гелиевых температур в слабом поле $H' \lesssim 0,1 H$.

Оказалось, что для всех исследованных образцов (см. таблицу), зависимости $M(T, H)$ в нашем диапазоне полей $H \lesssim 10^2$ Э с увеличением температуры всегда выходят на асимптоту $M_c(T)$, практически не зависящую от H (рис. 1). Такая зависимость следует из любой модели сильного пиннинга абрикосовских вихрей на ненасыщенном ансамбле неоднородностей ("модели Бина"⁷)²⁾, приводящей к независимости плотности критического тока j_c от магнитного поля H . При этом значение $j_c(T)$ для квадратного образца можно найти как¹⁾:

$$j_c(T) = - \frac{6}{D^3 d} M_c(T).$$

1) Физический факультет МГУ.

2) Этот вывод подтверждается проведенными нами измерениями эффекта Мейсснера, т. е. зависимости $M^*(T)$ при охлаждении пленки, начиная с $T > T_c$, в фиксированном поле H . Так при $H \approx 1$ Э и $T < T_c$ значения M^* составляли всего $\sim 1\%$ от соответствующих полной экранировке.

Как видно из рис. 1, зависимость $j_c(T)$ близка к линейной, кроме небольшого температурного интервала вблизи T_c . Этот вывод хорошо коррелирует с результатами прямых измерений $j_c(T)$ (рис. 2), проведенных нами с помощью стандартной четырехконтактной методики (для проведения этих измерений из напыленной пленки вырезался сапфировым резцом и напылялся через маску микромостик с размерами $\sim 0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$).

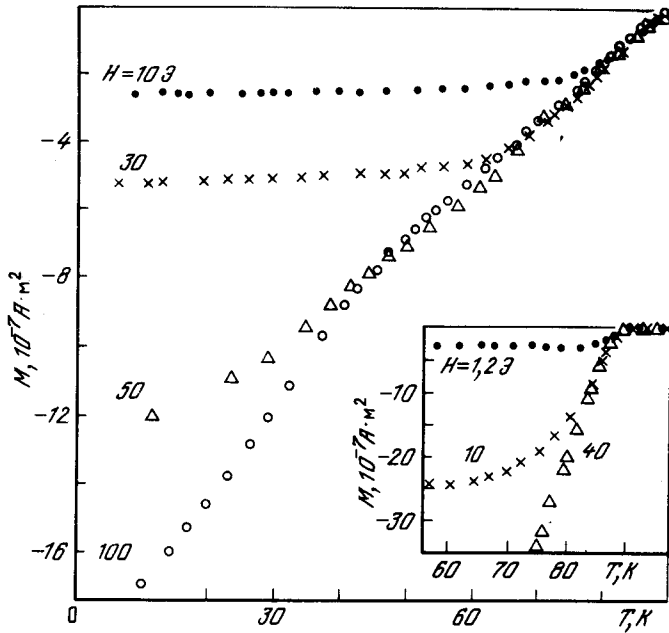


Рис. 1

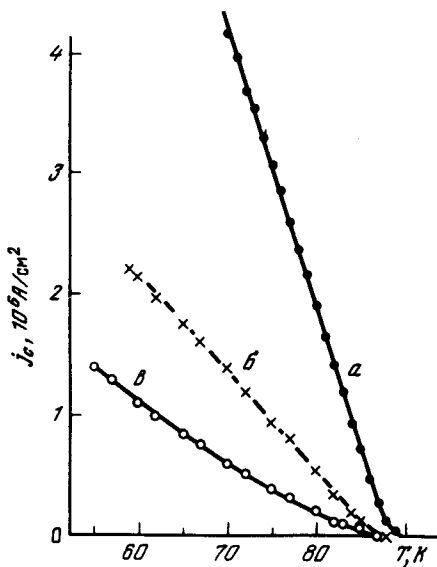


Рис. 2

Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности пленок Ho - Ba - Cu - O - 151 ($D = 1 \pm 0,1 \text{ мм}$, $d = 0,45 \pm 0,05 \text{ мкм}$) и Y - Ba - Cu - O - 102 ($D = 2 \pm 0,1 \text{ мм}$, $d = 0,20 \pm 0,05 \text{ мкм}$, вставка), полученные при отогреве в различных полях намагничивания H после охлаждения в поле $H' \lesssim 0,1 \text{ H}$

Рис. 2. Температурные зависимости плотности критического тока, полученные электрическими измерениями для пленок: а - Ho - Ba - Cu - O - 204, б - Y - Ba - Cu - O - 170, в - Eu - Ba - Cu - O - 177

**Критические токи (в 10^5 А/см²) монокристаллических пленок
высокотемпературных сверхпроводников ($T = 77$ К)³⁾**

Образец	Магнитные (бесконтактные) измерения	Электрические (контактные) измерения
Eu - Ba - Cu - O - 138	0,62	3,7
Eu - Ba - Cu - O - 177	8,0	2,0 - 4,0
Y - Ba - Cu - O - 102	11	-
Y - Ba - Cu - O - 170	1,7	2,3 - 7,5
Ho - Ba - Cu - O - 151	2,6	1,4
Ho - Ba - Cu - O - 204	-	26

В таблице приведены результаты измерений значений j_c при $T = 77$ К, полученные двумя описанными выше методами. Видно, что эти значения могут отличаться в ту или другую сторону в несколько раз. Наиболее вероятная причина такого различия — макроскопическая неоднородность пленок по площади подложки ($\sim 1 \times 1$ см²). Кроме этого, при контактном методе возможно уменьшение измеряемых значений j_c по сравнению с истинными под влиянием значительного тепловыделения в токовых контактах.

Нами было проведено также сравнение поведения вблизи T_c кривых $M_c(T)$ и $R(T)$, снятых указанными выше методами, друг с другом, а также с кривыми $\tilde{M}(T)$ экранировки пленкой слабого переменного поля⁵. Оказалось, что значения M , \tilde{M} и R достигают аппаратных нулей в точках, близких друг к другу, и заметно (на $1 \div 2$ К) ниже точки T_{c0} начала сверхпроводящего перехода на кривой $R(T)$. Этот результат представляется более естественным, чем полученный в работе⁴, где сообщалось о заметном диамагнитном отклике $\tilde{M}(T)$ вплоть до температур много больших T_{c0} .

Результаты работы показывают, что магнитные свойства монокристаллических пленок высокотемпературных сверхпроводников $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($R = \text{Y, Eu, Ho}$), ось с которых ориентирована перпендикулярно плоскости подложки, хорошо описываются, по крайней мере в небольших ($\lesssim 100$ Э) полях, моделью Бина, а бесконтактный магнитный метод является удобным и надежным способом измерения T_c и зависимостей $j_c(T)$.

Литература

1. Авдеев Л.З., Быков А.Б., Демьянец Л.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 196.
2. Chaudhari P., et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 2684.
3. Webb C., et al. Appl. Phys. Lett., 1987, 51, 1191.
4. Laibowitz R.B., et al. Phys. Rev. B, 1987, 35, 8821.
5. Головашкин А.И., Екимов Е.В., Красносвободцев С.И., Печень Е.В. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 157.
6. Avdeev L.Z., et al. IEEE Trans. Magn., 1985, MAG 21, 914.
7. Сан-Жам.Д., Сарма Г., Томас Е. Сверхпроводимость второго рода, М.: Мир, 1970, гл. 8 и 10.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 марта 1988 г.

³⁾ Интервалы значений j_c соответствуют измерениям на различных участках данного образца; прочерки означают, что измерения одним из методов не проводились.