

УДК 05.04

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦА YBaCuO С ТОКОМ  
В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ**

© 2013 г.

С.А. Чури́н

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

churin@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 08.10.2013

Методом top seed с использованием нескольких монокристаллических зародышей SmBaCuO выращены текстурированные кристаллы YBaCuO в форме колец. Показано, что магнитное поле кольца с током находится в сильной зависимости от режимов кристаллизации. Приводится объяснение этой зависимости. Измерена плотность тока, текущего по кольцу.

*Ключевые слова:* высокотемпературная сверхпроводимость, кольцо, магнитное поле, плотность тока.

Высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) кольца из соединения YBaCuO находят широкое применение в качестве элементов магнитных подвесов, гибридных магнитов, магнитов [1–3]. Плотность критического тока колец YBaCuO находится в сильной зависимости от их структурного совершенства. Это связано с малой длиной когерентности куперовских пар в ВТСП-материалах. В наиболее совершенных кристаллах YBaCuO плотность критического тока достигает  $10^4$ – $10^5$  А/см<sup>2</sup> при температуре кипения жидкого азота в нулевом внешнем магнитном поле. Для получения колец с совершенной структурой наибольшее распространение получил метод top seed. Монокристаллический зародыш из ВТСП-материала с температурой плавления более высокой, чем у YBaCuO, помещают на YBaCuO-загрузку в форме цилиндра, и в нём выращивают хорошо текстурированный кристалл YBaCuO [4]. Рост кристалла идёт от зародыша. Загрузка изготавливается методом порошковой технологии. Из выращенного кристалла вырезают кольцо. Однако скорость роста кристаллов YBaCuO не превышает нескольких десятых долей миллиметра за час. С применением одного зародыша время выращивания кристалла больших размеров (35 на 35 мм) составляет несколько десятков часов. Необходимо отметить, что с увеличением размеров кристалла скорость роста падает.

Скорость роста кристаллов YBaCuO увеличивается с увеличением переохлаждения, но структура кристалла в этом случае становится менее совершенной [4]. Одним из методов, который позволяет вырастить кристаллы большого размера, является top seed с использованием нескольких зародышей [5]. В этом случае на загрузке размещаются несколько зародышей. В

качестве загрузки может быть выбрано кольцо. В этом случае от зародышей растут домены, которые при достаточных их размерах сростаются, образуя кристалл с хорошей для практического применения структурой. С другой стороны, хорошо известно, что в процессе роста кристаллов в ряде случаев примесь скапливается на границе кристалл – материнская фаза. Такое поведение примесей может существенно уменьшить плотность критического тока в сростках кристаллов YBaCuO. Снижение плотности критического тока может быть связано также с разворотом доменов вокруг оси «с». Такого разворота трудно избежать, размещая зародыши на поверхности кольца. Необходимы эксперименты для выбора разумного сочетания числа зародышей на поверхности загрузки, переохлаждения загрузки и времени кристаллизации с целью получения наибольшего тока в кольце YBaCuO в сверхпроводящем состоянии.

В настоящей работе с использованием монокристаллических зародышей SmBaCuO выращены блочные кристаллы YBaCuO в форме колец. Найдено распределение магнитного поля кольца в сверхпроводящем состоянии. Установлена взаимосвязь между режимами кристаллизации и свойствами колец в сверхпроводящем состоянии.

Для выращивания блочных кристаллов YBaCuO в форме колец использовались загрузки в форме колец высотой 27 мм, внешним и внутренним диаметром 36 и 20 мм соответственно. Загрузки изготавливались из смеси порошков YBaCuO – 100 г, YBaCuO – 30 г и CeO<sub>2</sub> – 1 г методом холодного прессования. Закристаллизованы две загрузки. В качестве зародышей использовались монокристаллические пластинки SmBaCuO неправильной формы

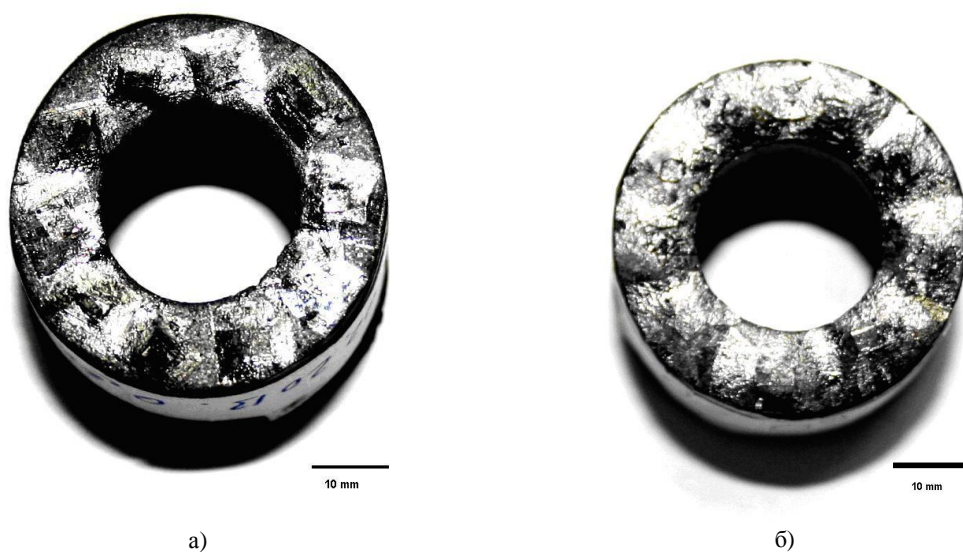


Рис. 1. Фотографии поверхности колец: (а) – первое кольцо, (б) – второе

толщиной не более 1 мм и площадью 2 – 4 мм<sup>2</sup>. Метод выращивания зародышей приведён в работе [6]. Зародыши в количестве 10 (первое кольцо) и 9 (второе кольцо) располагались на поверхности колец по среднему диаметру. Рост кристаллов осуществлялся в муфельной печи шахтного типа в форме цилиндра [4].

Температурный режим кристаллизации колец был следующим. В течение 300 минут загрузка нагревалась от комнатной температуры до 1038°C и в течение часа выдерживалась при этой температуре. Затем в течение 30 минут загрузка охлаждалась до температуры кристаллизации  $T_c$  и выдерживалась при этой температуре (время кристаллизации)  $t_c$  часов. После истечения времени кристаллизации питание печи отключалось. Температура кристаллизации составляла для первого кольца – 1002°C, для второго – 1000°C. Время кристаллизации для первого кольца составляло 20 часов, для второго – 24 часа. В процессе кристаллизации отклонение температуры в печи от заданного значения не превышало 0.3°C. После кристаллизации кольца отжигались при температуре 600°C в токе кислорода в течение 5 часов. Время набора температуры и охлаждения составило 10 часов. Кольца намагничивались их охлаждением в поле соленоида с вертикальной компонентой индукции 174 мТл до температуры кипящего азота. После охлаждения кольца ток через соленоид плавно снижался до нуля. Распределение вертикальной компоненты захваченного магнитного поля ( $B_z$ ) охлаждённых кристаллов по высоте и по их диаметру изучалось с применением датчика Холла. На основании полученных результатов определялась

плотность тока, текущего по кольцу. Результаты измерений связывались с режимами кристаллизации.

После кристаллизации размеры колец заметно изменились. Внешний диаметр колец уменьшился до 31 мм, внутренний – до 17 мм, высота – до 23 мм. Уменьшение размеров исходной загрузки связано с термокапиллярным эффектом, сопровождающим её плавление и кристаллизацию. На рис. 1 приведены фотографии поверхности колец. Отчётливо видны закристаллизовавшиеся области в форме прямоугольников. Между закристаллизовавшимися участками первого образца видны области исходной структуры (рис. 1а). В случае второго образца закристаллизовалась вся поверхность кольца (рис. 1б). На боковых поверхностях кольца видно, что толщина кристаллов составляет 4 – 5 мм. Результаты исследования структурного совершенства показывают, что закристаллизовавшаяся область (домен) является текстурой с осью «с», отклоняющейся от нормали к его поверхности на несколько градусов в различных точках [4].

На рис. 2 приведено распределение вертикальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z$  по высоте кольца. Датчик Холла перемещался через центр кольца. Максимальное значение индукции достигается внутри кольца на середине закристаллизовавшейся области. Для первого кольца  $B_z = 25$  мТл, для второго кольца – 40 мТл. Заметны различия для колец и в распределении индукции магнитного поля по диаметру колец (рис. 3). Датчик Холла перемещался по диаметру кольца на высоте 2–3 мм. Экстремальные значения индукции приходятся на

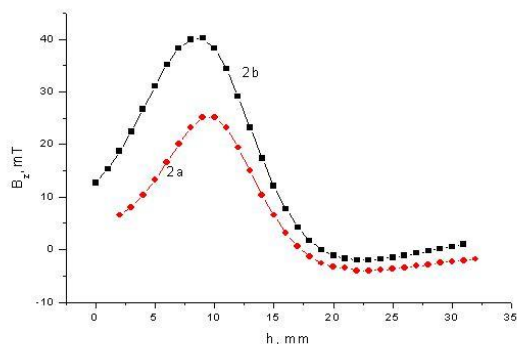


Рис. 2. Зависимость индукции магнитного поля  $B_z$  от местоположения датчика Холла по высоте на оси кольца: 2a – для первого кольца, 2b – для второго кольца

средний диаметр кольца. В центре кольца индукция заметно больше для первого кольца. Обращает на себя внимание тот факт, что максимальное значение индукции на среднем диаметре заметно больше для первого кольца. Возможно, это связано с тем, что ток в основном идёт по закристаллизовавшейся области, которая меньше в случае первого кольца. Локальная плотность критического тока в первом кольце может быть выше, чем во втором. Не исключено, что для первого кольца ток в кристаллическом домене больше, чем кольцевой ток.

Для расчёта средней плотности критического тока в кольце представим его как совокупность витков с радиусом от  $r$  до  $R$  и высотой  $h$ .

Предположим также, что плотность критического тока ( $j$ ) одинакова по сечению кристаллической области кольца и много больше, чем в материнской фазе. В этом случае можно оценить величину плотности критического тока, текущего в кольце:

$$j = \frac{cB_z}{2\pi h \ln(R/r)},$$

где  $B_z$  – индукция в центре кольца,  $c$  – скорость света,  $h$  – высота закристаллизовавшейся области,  $R$  – внешний радиус кольца,  $r$  – внутренний радиус кольца. Подставляя сюда максимальное значение индукции – 40 мТ (рис. 1), высоту закристаллизовавшейся области – 4 мм, находим,

## MAGNETIC FIELD OF A YBaCuO SUPERCONDUCTING RING WITH CURRENT

S.A. Churin

YBCO melt-textured crystals in the form of a ring have been grown from  $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  monocrystalline embryos by the top-seeded solution growth method. A strong dependence of the magnetic field of the ring with current on the crystallization modes is shown and explained. The ring current density has been measured.

*Keywords:* high-temperature superconductivity, ring, magnetic field, current density.

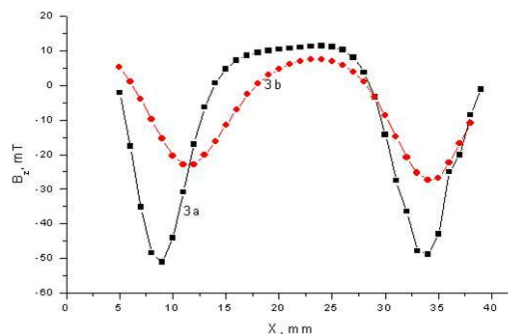


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля  $B_z$  от местоположения датчика Холла над поверхностью колец. Датчик Холла перемещался по диаметру. Для первого кольца – 3a, для второго кольца – 3b

что плотность критического тока в кольце 2 составляет  $5300 \text{ A/cm}^2$ . В первом кольце –  $3300 \text{ A/cm}^2$ .

Таким образом, в настоящей работе показано, что использование нескольких зародышей для кристаллизации колец YBaCuO не влияет существенно на плотность критического тока в кольце. Более заметное влияние оказывают режимы (переохлаждение и время) кристаллизации. Можно предположить, что примесь в процессе кристаллизации оттесняется растущим кристаллом в глубь материнской фазы. Возможно, что рассмотренным методом можно вырастить кольца большего диаметра с плотностью критического тока не ниже, чем в данном случае.

### Список литературы

1. Kyohei Ogawa, Takashi Nakamura, Yasuhiko Terada et al. // Applied Physics Letters. 2011. V. 98. P. 234101.
2. Kim S.B., Takano R., Nakano T. et al. // Physica C. 2009. V. 469. P. 1811–1815.
3. Краснощёков Е.П. // Журн. технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 142–144.
4. Чурин С.А., Юнин П.А. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1(1). С. 53–56.
5. Li T.Y., Wang C.L., Sun L.J. et al. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 023914.
6. Чурин С.А. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 1(1). С. 33–36.