

05;12
©1995 г.

УПРАВЛЯЕМОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ВТСП МАТЕРИАЛОВ: ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНТАКТОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ

А.Ю.Волков, А.А.Буш

Обнинский институт атомной энергетики,
249020, Обнинск, Россия
(Поступило в Редакцию 13 июля 1994 г.)

Методом бестигельной зонной плавки с оптическим нагревом впервые получены текстурированные слитки ВТСП фазы Bi-2212 с заданным (путем изменения линейной скорости кристаллизации) изменением вдоль их оси степени текстурирования и содержания примесных фаз. Проведены рентгенографические исследования образцов, определены локальные катионные химические составы, с помощью микродатчика Холла измерены локальные магнитные поля. Путем управляемого текстурирования и изменения фазового состава сформированы образцы, имеющие повышенные значения плотности критического тока в приконтактных областях. Эти образцы предложено использовать для защиты от теплового разрушения контактов ВТСП-металл сильноточных сверхпроводящих устройств. Проведены испытания локальной токонесущей способности таких образцов. В сравнительном эксперименте продемонстрирована эффективность защиты контактов от теплового разрушения под действием транспортного тока в нарастающем внешнем магнитном поле.

Введение

В настоящее время важным направлением работ по технологии высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) является разработка способов изготовления текстурированных образцов. При этом в ряде работ выявлена четкая корреляция между технологическими параметрами, с одной стороны, степенью текстурирования и фазовым составом, с другой [1-19]. Однако это направление работ развивается преимущественно в сторону увеличения степени текстуры и повышения однородности текстурированных образцов. Вероятно, поэтому во всех известных нам публикациях описаны текстурированные ВТСП, при изготовлении которых технологические параметры изменяли от образца к образцу, но не в пределах одного образца. Не ставя под сомнение важность таких работ, отметим, что существует возможность

нового, развиваемого авторами подхода — управляемого текстурирования, основанного на контролируемом изменении текстуры в пределах одного образца при его изготовлении. Помимо чисто научного интереса (исследование границ раздела фаз и текстур) этот подход позволяет решить ряд практических задач [20] и создать новый класс сверхпроводящих устройств с интересными электрофизическими свойствами [21–23]. На момент написания данной работы авторам аналогичные исследования известны не были.

В настоящей работе дается подробное описание технологии управляемого текстурирования, на основе которой изготовлены образцы фазы Bi-2212 с заданным профилем текстуры и продемонстрирована возможность использования управляемого текстурирования для защиты токовых контактов от перегрева транспортным током в условиях действия нарастающего внешнего магнитного поля.

Нужно отметить, что развитие нового подхода повышает значение методов контроля локальных неоднородностей различных параметров ВТСП. Учитывая, что исследованиям случайно распределенных в образце неоднородностей уделяется сравнительно мало внимания, мы затронем здесь этот вопрос и приведем данные исследования локальных магнитных полей микродатчиком Холла на наших образцах с контролируемо изменяемым профилем текстуры.

1. Получение образцов

Удобным способом формирования образцов ВТСП фаз с заданным профилем неоднородностей фазового состава и микроструктуры является метод бестигельной зонной плавки с оптическим нагревом (ОЗП). Степень текстурирования и фазовый состав таких образцов зависят от линейной скорости перекристаллизации [11–14], что дает возможность управляемо их варьировать по длине образца в процессе его получения. Для формирования образца с требуемыми сверхпроводящими параметрами в нужных участках следует принимать во внимание особенности его последующей эксплуатации (расположение токоподводящих контактов, плотность рабочего тока, напряженность и вектор магнитного поля), а также особенности роста кристаллов (анизотропия скорости роста по различным кристаллографическим направлениям, связь их ориентации со скоростью движения зоны [19], перераспределение примесных фаз). Технологию, позволяющую получать такие разнотекстурированные образцы, мы назвали методом управляемого текстурирования. Этот метод, в частности, позволяет получать высокотекстурированные образцы ВТСП фаз $\text{Bi}_4(\text{Sr}, \text{Ca}, \text{Bi})_{n+2}\text{Cu}_n\text{O}_{8+2n+\delta}$ с $n = 2$ (фаза 2201), 3 (4413) и 4 (2212) системы $\text{BiO}_{1.5}\text{-SrO-CaO-CuO}$ [11–17].

Наиболее результативно применение метода ОЗП для получения Bi -содержащих фаз 2212 и 2201. Практически однофазные текстурированные образцы указанных фаз образуются при перекристаллизации керамических стержней составов $\text{Bi}_{2+u}\text{Sr}_{2-u}\text{CuO}_y$, $0.2 < u < 0.6$ и $\text{Bi}_{2+u}(\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x)_{3-v}\text{Cu}_2\text{O}_y$, $0.1 < u, v < 0.3$; $0.1 < x < 0.6$ соответственно с линейной скоростью $V < 3$ мм/ч. На образование фазы 4413 стабилизирующее влияние оказывают добавки Fe_2O_3 .

Получение методом управляемого текстурирования образцов ВТСП фазы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ затрудняется повышенной летучестью при

температурах синтеза компонентов BaO и CuO , а также значительной разницей между температурами ликвидуса и солидуса соответствующего состава. Нами проведена работа по подбору добавок, понижающих температуру плавления и стабилизирующих процесс зонной перекристаллизации этой фазы. Установлено, что для этих целей весьма перспективно использование Bi_2O_3 . В результате снижения температуры плавления летучесть компонентов практически прекращается и становится возможным удерживать плавающую зону расплава в течение длительного времени. Получены практически однофазные текстурированные образцы фазы Y-123 с $T_c = 90\text{ K}$ и $j_c(77\text{ K}) = 500\text{ A/cm}^2$.

Для описанных ниже исследований использовали текстурированные образцы ВТСП фазы Bi-2212, полученные методом ОЗП на установке УРН-2-ЗП по описанной в [11-14] методике.

Эти образцы, полученные при $V = 3.0\text{ мм/ч}$, имеют вид цилиндрических слитков диаметром до 10 мм и длиной до 60 мм, они состоят из тонкопластинчатых кристаллов, ось a которых ориентирована вдоль, а ось c перпендикулярно оси були (ось c различных кристаллитов при этом не имеет определенного направления в плоскости, перпендикулярной оси роста). Объемная плотность були (6.3 г/см^3) близка к рентгеновской. T_c и $j_c(77\text{ K})$ образцов достигали 95 K и $3 \cdot 10^3\text{ A/cm}^2$. Для повышения критических параметров существенное значение имеет послеростовой обжиг образцов в области 650-750°C.

Уменьшение V ниже 2 мм/ч вызывает рост размеров кристаллитов и увеличение степени их упорядочения вдоль оси були, появляется также тенденция к упорядочению ориентаций оси c различных кристаллитов. При возрастании V выше 3 мм/ч в образцах появляется заметное количество примесных фаз (в основном 2201) и уменьшаются размеры кристаллитов.

Для получения методом управляемого текстурирования образцов с улучшенными сверхпроводящими свойствами приконтактных участков, а также для изучения границ раздела текстур и фаз в одном образце применялась следующая технология. Скорость кристаллизации составляла 3.0 мм/ч в течение первых 3 и последних 5 ч и 9.0 мм/ч в течение четвертого и пятого часов процесса. Результаты микроскопических и рентгенографических исследований показывают, что в соответствии со значениями скорости роста размеры кристаллитов, степень их ориентированности, а также относительное содержание фазы 2212 на концах полученных цилиндрических образцов были выше, чем в их середине. Типичные размеры кристаллитов на концах и в середине образца составляли $0.1 \times 3 \times 6$ и $0.1 \times 0.5 \times 1$ мм соответственно.

Рентгенографически с помощью дифрактометра ДРОН-3 установлено, что участки образца, полученные с низкой скоростью кристаллизации, состояли из 95 % фазы 2212 и 5 % фазы 2201; на участках образцов, полученных со скоростью 9 мм/ч, содержание примесной фазы 2201 увеличивалось до 30 %. По данным рентгеноспектрального микроанализа, выполненного на спектрометре САМЕВАХ-301, вариации катионных химических составов фаз 2212 и 2201 по области их гомогенности [13] в разных точках изучаемого образца лежали соответственно в пределах $\text{Bi}_{(2.23-2.15)}\text{Sr}_{(1.88-1.95)}\text{Ca}_{(1.21-1.00)}\text{Cu}_2\text{O}_z$ и $\text{Bi}_{(2.25-2.32)}\text{Sr}_{(1.22-1.38)}\text{Ca}_{(0.52-0.44)}\text{CuO}_z$. Усредненные результаты измерений в ~20 разных точках соответствуют формулам $\text{Bi}_{2.18}\text{Sr}_{1.93}\text{Ca}_{1.10}\text{Cu}_2\text{O}_z$ и $\text{Bi}_{2.24}\text{Sr}_{1.31}\text{Ca}_{0.48}\text{CuO}_z$. Измерения атомных

концентраций W_i и W_{Cu} вдоль диаметра цилиндрического стержня на участке, выращенном со скоростью 3.0 мм/ч, указывают на то, что содержание примесной фазы 2201 в центральной части образца выше, чем в периферийной.

Для исследования с помощью микродатчика Холла разнотекстурованных участков образца и границ их раздела один из стержней был разрезан на две равные части вдоль оси цилиндра. Результаты исследования описаны ниже (раздел 3). Аналогичные образцы использованы для создания токонесущего элемента сверхпроводящего переключателя [21] с защищенными контактами (раздел 4).

2. Локальные неоднородности: их исследование и влияние на свойства ВТСП образцов

Давно было замечено, что образцы ВТСП могут иметь случайно возникающие при изготовлении микроскопические локальные неоднородности структуры химического и фазового составов, размеры которых превышают характерные размеры микроструктуры (например, зерен в поликристаллах). Поскольку такие неоднородности вызывают вариации по объему локальных физических свойств, в том числе и сверхпроводящих, то их влияние необходимо учитывать в методике и интерпретации результатов экспериментов, а также в технологии ВТСП материалов. Последнее важно потому, что наличие неконтролируемых неоднородностей может существенно затруднить практическое использование образцов. Поэтому при определении основных параметров ВТСП материалов — температуры перехода в сверхпроводящее состояние (T_c), критической плотности тока (j_c) и др. наряду с их интегральными значениями важно также контролировать однородность измеряемых параметров на данном участке или по всему объему образца.

Особо актуальным это становится при исследовании и применении образцов с управляемо контролируемым изменением структуры. Эти образцы заведомо имеют заданные макроскопические участки с разными структурами, однако в пределах каждого такого участка необходимо обеспечить и проконтролировать однородность требуемого параметра. Тем не менее, как отмечалось выше, исследованиям неоднородностей, случайным образом распределенных в образце, уделяется сравнительно мало внимания [24–29], а управляемое распределение только начинает изучаться [17,20].

Кратко обсудим некоторые работы.

Наличие случайных вариаций локальных значений j_c в образцах ВТСП фазы $YbBa_2Cu_3O_y$ и их влияние на критический ток всего образца были обнаружены и изучены в [24,25] по результатам определения вольт-амперных характеристик отдельных участков образца. В высокоплотной керамике фазы $YBa_2Cu_3O_y$ обнаружено существование приповерхностных слоев толщиной 30 мкм, отличающихся плотной упаковкой плоских больших кристаллитов и повышенными значениями j_c [26]. Данные о неоднородностях керамики ВТСП фаз $RBa_2Cu_3O_y$, $R = Y$, Ho [27,29], керамики и текстурированных слитков Bi -содержащих ВТСП фаз [17] получены с помощью измерений датчиком Холла локального магнитного поля внутри и/или на поверхности образцов.

Последний метод был использован нами для изучения образцов, полученных по технологии управляемого текстурирования.

3. Контроль критических параметров в образцах с управляемым изменением структуры

Для изучения характеристик разнотекстурированных участков образцов был использован метод, основанный на измерении микродатчиком Холла локального магнитного поля внутри и на поверхности образца, помещенного во внешнее однородное магнитное поле. Зависимость величины измеряемого магнитного поля от величины захваченного исследуемым участком образца магнитного потока, которая в свою очередь зависит от значения локального j_c , позволяет по данным таких измерений определять вариации j_c по объему. Методика подобных измерений на классических низкотемпературных сверхпроводниках описана в [30], где измерения профиля магнитного потока велись с помощью датчика Холла, который перемещался в тонком отверстии, проходящем поперек образца. Для изучения проникновения магнитного поля в ВТСП материалы эта методика использовалась в [17,27-29].

Определение пространственных неоднородностей разнотекстурированных образцов проводили при 77 К с помощью микродатчика Холла с размером рабочей площадки $0.5 \times 0.15 \times 0.01$ мм. Датчик перемещался вдоль или поперек оси роста в щели между половинками образца (рис. 1). Диапазон изменения внешних полей составлял 0–200 Э, разрешающая способность по линейному перемещению датчика Холла < 0.1 мм, по величине магнитного поля — 0.2 Э. Исследования пространственной неоднородности проводились в режиме экранировки (ZFC): образец охлаждался в нулевом поле, после чего включалось внешнее постоянное магнитное поле H и в этом поле проводились измерения.

Результаты измерений зависимости магнитного поля вдоль оси образца в поле $H_e = 23$ Э от текущей координаты x указывают на наличие выраженной корреляции между величиной локального магнитного

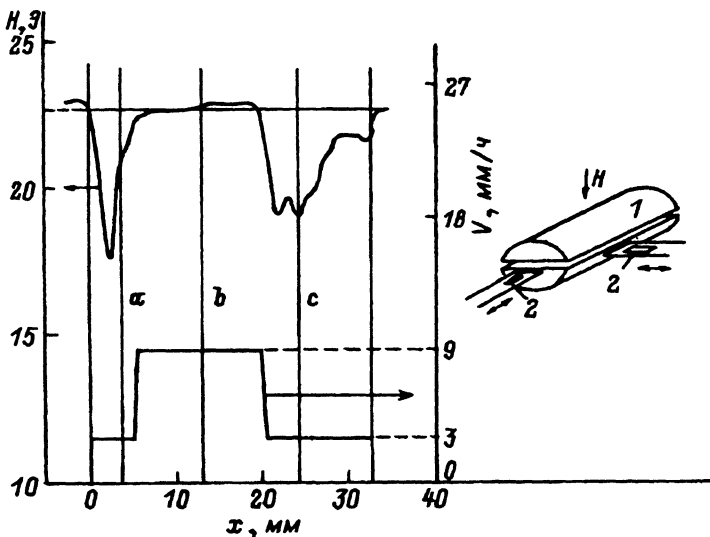


Рис. 1. Результаты измерений магнитного поля H (Э) вдоль оси образца, геометрия эксперимента и изменение скорости кристаллизации вдоль оси x (мм) стержня (1 — образец, 2 — датчик Холла).

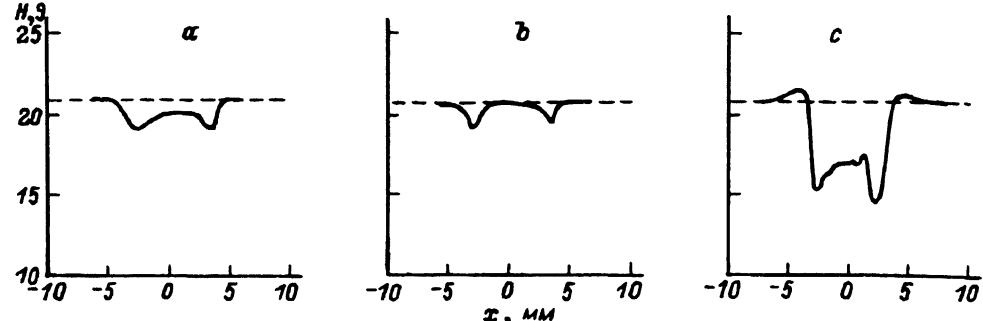


Рис. 2. Результаты измерений магнитного поля H (Э) перпендикулярно оси образца вдоль диаметров сечений, обозначенных a , b , c на рис. 1.

поля и скоростью кристаллизации исследуемого участка V (рис. 1). Участки, выращенные с меньшими скоростями, имеют большие значения диамагнитного отклика и соответственно большие значения j_c . Данные о распределении магнитного поля поперек оси роста образца (рис. 2) свидетельствуют о наличии неоднородностей и в радиальном направлении, которые коррелируют с распределением примесной фазы 2201. Наивысшими значениями критических параметров обладает периферийная часть образца, где содержание этой фазы понижается.

Таким образом, данная методика позволяет быстро и надежно определять области ВТСП образцов с пониженными или повышенными значениями j_c . Метод ОЗП позволяет получать управляемо-текстурированные образцы ВТСП фаз системы $\text{BiO}_{1.5}\text{-SrO-CaO-CuO}$ с контролируемо-изменяющейся по их длине степенью текстурирования, что подтверждают проведенные измерения локальных магнитных полей.

4. Применение управляемого текстурирования: защита сильноточных контактов

Проблема надежных, низкоомных и механически прочных контактов весьма актуальна для сильноточных применений ВТСП. Известно, что джоулев нагрев и связанные с ним электрохимические процессы, протекающие в приконтактных участках под действием постоянного тока, ведут к понижению критической плотности тока j_c в этих областях и порче контактов [26,31,32]. Особую остроту проблема контактов приобретает в случае исследования и использования токонесущих ВТСП элементов в режимах, близких к критическому по магнитному полю и/или по плотности тока.

Заметим, что существует способ предохранения контактов металл-сверхпроводник от отгорания и перегрева путем сужения центрального участка токонесущего элемента. Однако этот способ был разработан и, как правило, применяется в технологии низкотемпературных сверхпроводников, имеющих относительно однородные свойства по объему. Работа с ВТСП требует особого подхода, учитывающего специфику этих материалов. Известна существенная неоднородность свойств поликристаллов, в том числе текстурированных, по толщине образца. Это связано с особенностями технологии и термообработки образцов ВТСП. Из рис. 2 видно, что периферийные слои монокристаллических

ростков имеют более высокие сверхпроводящие характеристики, чем середина. Авторы [26] также отмечали, что даже поперечные царапины на поверхности ВТСП образца ухудшают его токонесущие свойства, поскольку слой с наивысшим значением j_c находится на малой глубине. Из сказанного ясно, что применение известного метода к ВТСП материалам приводит к произвольному изменению их свойств и ставит новые проблемы (дополнительная термообработка, необходимость контроля локальных неоднородностей). Таким образом, практическое использование ВТСП материалов возможно только с учетом их особых свойств.

Необходимость применения специальных мер для защиты сильноточных контактов ВТСП–металл обсуждалась в [20]. В этой работе впервые было предложено формировать приконтактные участки токонесущего элемента из ВТСП с более высокими критическими параметрами. Как подтвердили наши эксперименты, такая структура образца позволила значительно уменьшить влияние тепловыделения в контакте на токонесущие свойства приконтактного участка. В результате j_c этого участка, даже “подогретого” тепловыделением в металле, была не ниже j_c других участков.

Исходя из эквивалентности влияния транспортного тока и внешнего магнитного поля на сверхпроводник можно предположить, что эффект защиты контактов должен сходным образом проявляться как при токовом воздействии, так и в нарастающем магнитном поле. Целью экспериментов являлось сравнение поведения защищенного текстурой и традиционных контактов на одном образце при разных токах в постоянном магнитном поле и в нарастающем магнитном поле при постоянном токе.

Для изучения эффективности защиты контактов сверхпроводника описанным выше методом по нашей технологии управляемого текстурирования изготовлен токонесущий элемент в виде параллелепипеда размером $1 \times 2 \times 26$ мм. Один из концов образца (левый на рис. 3), был выращен со скоростью 3.0 мм/ч, остальные участки — 9.0 мм/ч. С помощью серебряной пасты на торцы параллелепипеда были нанесены токовые контакты, а на одну из боковых граней — параллельные полоски потенциальных контактов с шагом 2 мм. После отжига образца при температуре 700°C сопротивление контактов не превышало 0.2 Ом. Все потенциальные контакты соединялись с коммутационным устройством, позволяющим измерять разность потенциалов ΔU между любой парой соседних контактов.

Измерения локальных значений j_c по длине образца (рис. 3,а) подтверждают зависимость этого параметра от скорости перекристаллизации и возможность формирования образцов с заданными сверхпроводящими свойствами в разных участках. В нашем случае использование токонесущего элемента с повышенными критическими параметрами в области одного контакта при традиционном изготовлении второго приконтактного участка дает возможность сравнения условий работы и степени защищенности двух контактов.

Все измерения проводились в жидком азоте.

На рис. 3,а представлены изменения вдоль оси образца величины ΔU при протекании по нему разных по величине транспортных токов (0.4, 0.8 и 1.6 А). Все измерения проводились в постоянном магнитном поле 0.8 Тл, ориентированном перпендикулярно направлению тока. Видно, что ток 0.4 А, критический для центральной области, еще

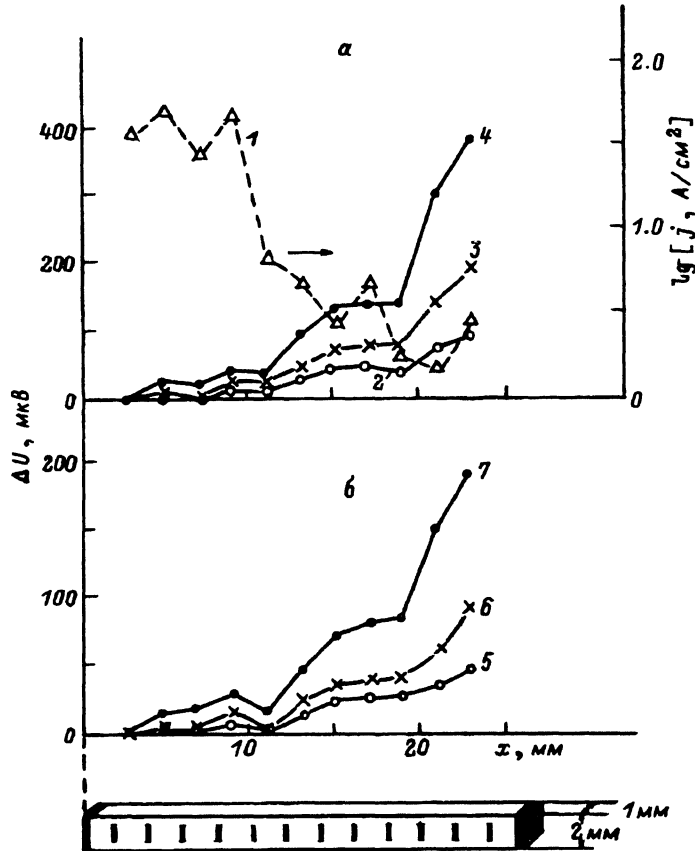


Рис. 3. Распределение плотности критического тока j_c (A/cm²) вдоль оси образца (1) и разности потенциалов ΔU между соседними парами потенциальных контактов вдоль оси образца при фиксированном внешнем магнитном поле (0.8 Тл) и разных значениях транспортного тока (2 — 0.4, 3 — 0.8, 4 — 1.6 А) (а) и при фиксированном транспортном токе (0.8 А) и разных значениях внешнего магнитного поля (5 — 0.6, 6 — 0.7, 7 — 0.8 Тл) (б). Показаны также геометрия образца, расположение на нем токовых и потенциальных контактов.

не переводит приконтактный левый участок в нормальное состояние. Только при 1.6 А появляются признаки перехода в нормальное состояние левого защищенного контакта. На всех кривых отчетливо видно влияние перегрева правого приконтактного участка, изготовленного по стандартной "однородной" технологии.

На этом же рисунке показано изменение вдоль оси образца величины j_c , измеренной резистивным методом по порогу 1 мкВ/мм в том же магнитном поле 0.8 Тл. Видно, что критические параметры материала левого приконтактного участка значительно выше остальных участков, что и позволяет предохранить этот контакт от перегрева и отгорания. Подчеркнем, что текстура в левом участке образца имеет преимущественное направление плоскостей a , b кристаллитов, параллельное действующему току. Такая ориентация позволяет даже в случае перехода приконтактного участка в нормальное состояние обеспечить более низкое удельное сопротивление и, следовательно, пониженное

тепловыделение на этом участке по сравнению с другими, имеющими меньшую степень текстурирования.

Результаты аналогичных измерений (рис. 3, б), полученных при протекании фиксированного тока 0.8 А через образец во внешнем магнитном поле, нарастающем до 0.8 Тл, демонстрируют возможность защиты контакта и в этих условиях. Так же как в первом случае (рис. 3, а), правый контакт работает в режиме перегрева, что приводит к закипанию азота на его поверхности.

Выводы

1. Путем вариации линейной скорости перекристаллизации при бестигельной зонной плавке можно контролировать изменение степени текстурирования и содержания примесных фаз вдоль оси цилиндрических слитков ВТСП фазы Bi-2212 . При этом соответствующим образом будут изменяться и критические параметры сверхпроводника.

2. Удобным способом контроля локальных параметров сверхпроводящих параметров образцов (достаточно высокое пространственное разрешение, простота интерпретации, экспрессность) является метод измерения магнитного поля с помощью микродатчика Холла.

3. Создание ВТСП образцов с заданным профилем текстуры может в некоторых случаях повысить эффективность их использования в технических устройствах. В частности, таким методом можно защищать от перегрева токоподводящие контакты сильноточных ВТСП устройств, в том числе работающих во внешних магнитных полях. Для этого j_c приконтактных областей должна быть более высокой, чем в остальных областях токонесущего элемента.

В заключение авторы выражают признательность А.Г. Лаптеву и С.Н. Гордееву за плодотворное участие в экспериментах и обработке данных.

Список литературы

- [1] *Malik M.K., Nair V.D., Biswas A.R. et al. // Appl. Phys. Lett.* 1988. Vol. 52. N 18. P. 1525–1527.
- [2] *Hampshire D.P., Seuntjens J., Cooley L.D., Larbalestier D.C. // Appl. Phys. Lett.* 1988. Vol. 53. N 9. P. 814–815.
- [3] *Chen K., Maheswaran B., Liu V.P. et al. // Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 55. N 3. P. 289–291.
- [4] *Trouilleux L., Dhalenne G., Revcolevschi A. // Cryst. Growth.* 1988. Vol. 91. P. 268–273.
- [5] *Seuntjens J., Cai X., Larbalestier D.C. // IEEE Trans. Magn.* 1989. Vol. 25. N 2. P. 2021–2025.
- [6] *Иоон Э., Хейнмаа И., Миллер А. и др. // Письма в ЖЭТФ.* 1989. Т. 50. Вып. 6. С. 296–299.
- [7] *Luo J., Jiang X.P., Chow H.M. et al. // IEEE Trans. Magn.* 1991. Vol. 27. N 2. P. 1499–1502.
- [8] *Yamada Y., Graf T., Seibt E., Flukiger R. // Ibid.* P. 1495–1498.
- [9] *Murakami M., Oyama T., Fujimoto H. et al. // Ibid.* P. 1479–1486.
- [10] *Aguillon C., McCartney D.G., Senoussi S., Tatlock G.J. // J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 69. N 12. P. 8161–8264.
- [11] *Balbashov A.M., Karabashev S.G., Nygmatulin A.S. // Proc. Europ. Conf. on High- T_c Thin Film and Single Crystals. Ustron (Poland): Wold Scientific, 1989. P. 95–106.*
- [12] *Буш А.А., Сиротинкин В.П., Гордеев С.Н. и др. // СФХТ.* 1989. Т. 2. № 5. С. 71–75.
- [13] *Буш А.А., Дубенко И.С., Мрост С.Э. и др. // СФХТ.* 1990. Т. 3. № 3. С. 432–441.
- [14] *Буш А.А., Романов В.Н., Куликов М.А., Титов Ю.В. // СФХТ.* 1990. Т. 3. № 8. Ч. 2. С. 1879–1889.

- [15] Буш А.А., Дубенко И.С., Романов Б.Н., Титов Ю.В. // Тез. докл. III Всесоюз. совещания по высокотемпературной сверхпроводимости. Харьков, 1991. Т. 4. С. 19–20.
- [16] Bush A.A., Dubenko I.S., Evtikhiev N.N. et al. // Abastr. Intern. Conf. on Superconductivity and Localisation Phenomena. Moscow, 1991. P. C2.
- [17] Laptev A.G., Bush A.A., Romanov B.N. // Ibid. P. M30.
- [18] Капчерин А.С., Папиров И.И., Стоев П.И. и др. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 1. С. 113–118.
- [19] Аксенова Т.Д., Братухин П.В., Шавкин С.В. и др. // СФХТ. 1993. Т. 6. № 9. С. 1909–1916.
- [20] Волков А.Ю., Буш А.А., Гордеев С.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 10. С. 21–26.
- [21] Волков А.Ю., Буш А.А., Гордеев С.Н. и др. // Патент России. № 1833055. H01L 39/24. 1990.
- [22] Волков А.Ю. // Патент России. № 1759203. H01L 39/16. 1992.
- [23] Волков А.Ю. // Патент России. № 1759204. H01L 39/16. 1992.
- [24] Otto A.J., Vander Sande J.V. // Physica. 1989. Vol. C159. N 4. P. 357–366.
- [25] Otto A.J., Vander Sande J.V. // Physica. 1991. Vol. C181. N 1/3. P. 191–200.
- [26] Таранин Д.А., Филиппов В.С., Козаков А.Т., Фесенко Е.Г. // Проблемы ВТСП / Под ред. В.П. Дудкевича. Ростов-на-Дону, 1990. Ч. 1. С. 128–134.
- [27] Mohamed M.A.-K., Jung J., Franck J.P. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 39. N 13. P. 9613–9614.
- [28] Mohamed M.A.-K., Jung J., Franck J.P. // Phys. Rev. 1990. Vol. B41. N 10. P. 6466–6478.
- [29] Mohamed M.A.-K., Jung J., Franck J.P. // Physica. 1990. Vol. B165–166. P. 1393–1394.
- [30] Кемпбелл А., Иветтс Дж. Критические токи в сверхпроводниках. М.: Мир, 1975. 332 с.
- [31] Гогава Л.А., Джапаридзе Е.Г., Канделаки А.Г. и др. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 5. С. 983–986.
- [32] Нефедов В.И., Соколов А.Н., Бельский Н.К., Очертянова Л.И. и др. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 5. С. 987–990.
-