

Монодоменные YBCO высокотемпературные сверхпроводники и устройства на их основе

Инженерный вестник # 01, январь 2014
 УДК: 531.383
 авторы: Сысоев М. А., Полущенко О. Л.

МГТУ им. Н.Э. Баумана
 ujikolp@bk.ru

Введение

Квазимонокристаллические монодоменные ВТСП элементы на основе иттриевых (YBCO) керамик наиболее перспективны для применения в магнитных подвесах роторов, левитирующих транспортных устройствах, в электротехнических и электроэнергетических устройствах, маховиковых накопителях энергии, гиродинах, сильных квазипостоянных магнитах. В однодоменных объемных YBCO материалах при температуре жидкого азота реализуются достаточно высокие значения критической плотности токов $J_s \approx 5 \cdot 10^4$ А/см² и захваченного магнитного поля свыше 1 Тл.

Эффективным способом получения монодоменных YBCO квазимонокристаллов является метод кристаллизации с затравкой из перитектического расплава [1], схема которого представлена на рисунке 1. В качестве прекурсора используется заготовка в виде цилиндра, параллелепипеда или иной формы, полученная по керамической технологии.

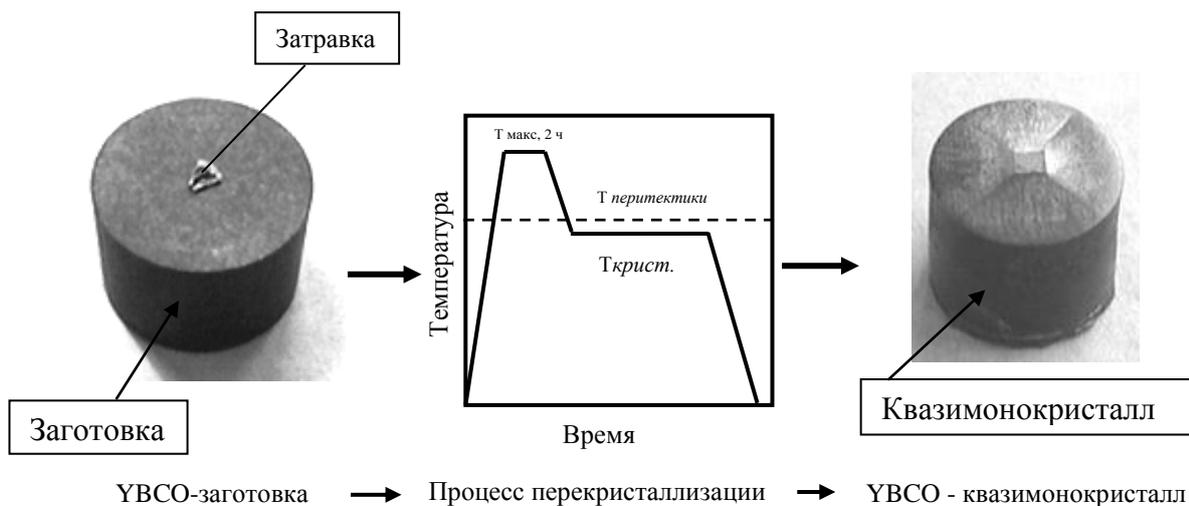


Рисунок 1 - Схема выращивания квазимонокристалла с использованием затравки

На ее верхнюю поверхность помещается заправка для контролируемого зарождения кристалла. Вся композиция помещается в печь, где нагревается до температуры выше перитектической и затем медленно охлаждается в режиме, который обеспечивает разрастание кристалла в объем заготовки.

Существуют различные модификации способа: кристаллизация в высоком градиентном температурном поле [2], в изотермических условиях [3,4], при медленном охлаждении [5] и мультитравочный [6]. Наиболее предпочтительным с точки зрения организации технологического цикла при производстве крупных партий ВТСП изделий является процесс кристаллизации в изотермических условиях. Он обеспечивает равномерную скорость кристаллизации и, как следствие, однородность свойств и их стабильную воспроизводимость. Полученный кристалл имеет 4-х полевою форму роста.

В известных технических решениях методом направленной кристаллизации стабильно получают монокристаллы $YBCO$ диаметром 30...35 мм. Изготовление квазимонокристаллов больших размеров представляет сложную технологическую задачу, так как по мере роста утрачивается травочная наследственность из-за накопления структурных дефектов, значительно увеличивается длительность процесса, приводящая к повышению вероятности зарождения посторонних кристаллов, нарушающих монокристаллическую выращиваемого кристалла.

Поэтому для сокращения времени кристаллизации и одновременно для получения качественных крупных монокристаллов состава $Y(RE)BaCuO$ разработан метод кристаллизации с использованием длинномерных заливок [7, 8]. Длинномерные заливки формируют на начальном этапе первичный кристалл большого размера, что обеспечивает дальнейший контролируемый рост основного кристалла и резкое сокращение времени кристаллизации.

1. Получение крупных монокристаллов состава $Y(RE)BaCuO$ методом кристаллизации с использованием длинномерных заливок.

В качестве материала заливки использовали монокристаллы $Gd-Ba-Cu-O$ керамики, полученные методом изотермической кристаллизации с малыми $Sm-Ba-Cu-O$ заливками. На рисунке 2 а, б показана фотография типичной верхней поверхности $Gd-Ba-Cu-O$ монокристалла, выращенного с малой заливкой и его схематическая иллюстрация. Длинномерные заливки характеризуются двумя основными параметрами: длиной и кристаллографической ориентацией в контактной поверхности, которые

определяют начальные условия направленного роста. Изготовлены три типа затравок прямоугольной формы длиной до 38 мм, шириной от 1,5 до 2 мм и высотой до 5 мм с затравочной плоскостью (001), отличающиеся направлением длинных ребер относительно кристаллографических направлений. Выбраны два основных

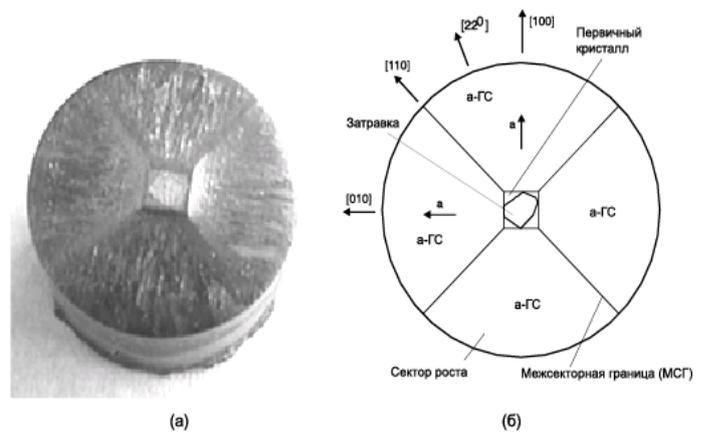


Рисунок 2 - Фотография (а) и схема (б) верхней поверхности Gd-Ba-Cu-O

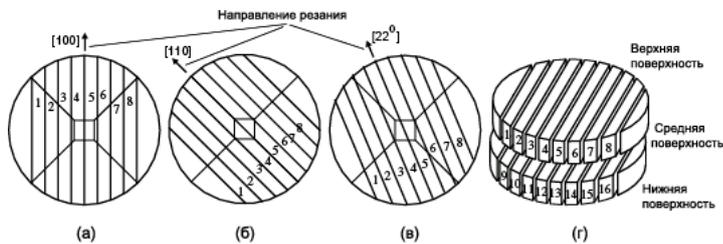


Рисунок 3 - Схема вырезания затравок из цилиндрического образца: (а) длинная ось затравки параллельна направлению [100], (б) длинная ось параллельна направлению [110], (в) длинная ось направлена под углом 22° к направлению [110], (г) схема вырезания затравок в изометрической проекции

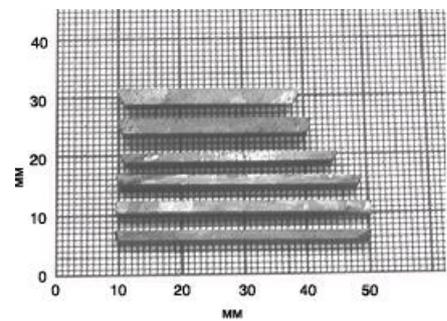


Рисунок 4 - Фотография комплекта длинномерных затравок из Gd-Ba-Cu-O

кристаллографических направления в плоскости **ав** кристалла: направление [100] и направление [110] и [110].

На рисунках 3,4 представлены схема вырезания затравок из Gd-Ba-Cu-O кристаллов и фотография комплекта затравок. Вырезали таким образом, чтобы длинное ребро затравки было параллельно выбранному направлению.

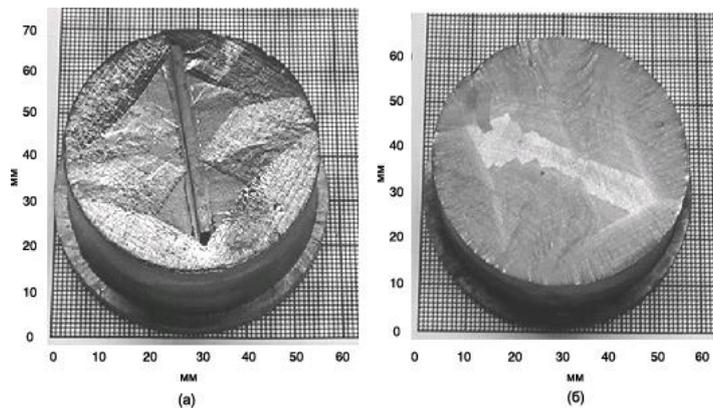


Рисунок 5 Фотографии образца Ø48мм: (а) непосредственно после кристаллизации, (б) после шлифовки. Затравка-110 размером $38 \times 1.8 \times 5 \text{ мм}^3$.

Фотография монодоменного образца, выращенного длинномерной затравкой-110, диаметром 48 мм и высотой 12 мм непосредственно после кристаллизации и после шлифования показаны на рисунке 5. Поверхность кристалла состоит из большого количества

кристаллов, выросших из первичных кристаллов, генерируемых затравкой. Границы, сформировавшиеся между ними, подобны межсекторным границам и являются малоугловыми, и, следовательно, не являются слабыми связями. Таким образом, длинномерные затравки обеспечивают большую скорость и лучшую направленность роста Y-Ba-Cu-O монокристаллов по сравнению с малыми затравками.

Магнитные измерения объемных монокристаллов ВТСП проведены во Всероссийском электротехническом институте на автоматизированном стенде. Картографирование захваченного магнитного поля проведено с помощью сканирующей Холловской магнитометрии на образцах, охлажденных до 77 К во внешнем магнитном поле величиной 1,5 Тл. Зазор между сенсором и поверхностью образца составил 0,5 мм. На рисунке 6 показано распределение индукции захваченного образцами магнитного поля над

поверхностью. Видно, что образец является монокристаллическим, без слабых связей и захватывает

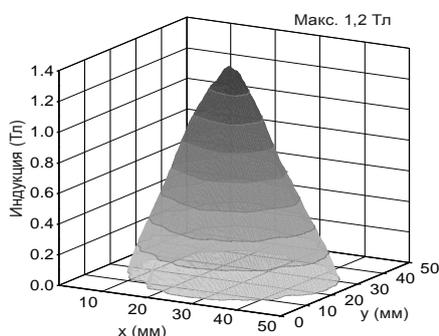


Рисунок 6 - Распределение захваченного поля в монокристаллическом образце, закристаллизованном с затравкой-110

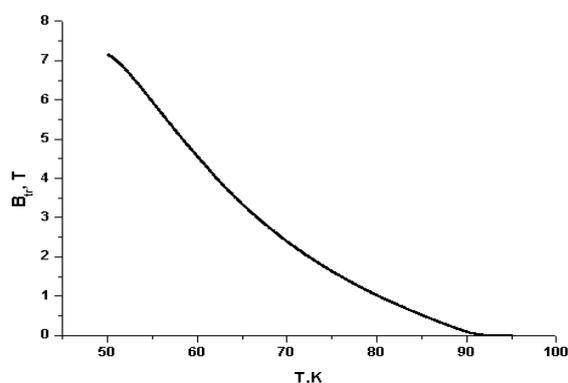


Рисунок 7 – Зависимость величины захваченного магнитного поля от температуры образца Ø15 мм.

магнитное поле до 1,2 Тл. В Международной лаборатории сильных полей и низких температур (Польша) проведены измерения в сильных магнитных полях при температуре ниже 77 К. При температуре 50 К образец диаметром 15 мм захватывает магнитное поле более 7 Тл (рисунок 7).

Взаимодействие монодоменных кристаллов с полем постоянных магнитов проводили на автоматизированном стенде для измерения силы левитации. На рисунке 8 представлен график силового взаимодействия при сближении и последующим удалении образца высокотемпературного сверхпроводника диаметром 36 мм, высотой 11 мм с Nd-Fe-B постоянным магнитом диаметром 28 мм и высотой 15 мм. Максимальная величина силы отталкивания составляет 122 Н, гистерезис 6 Н.

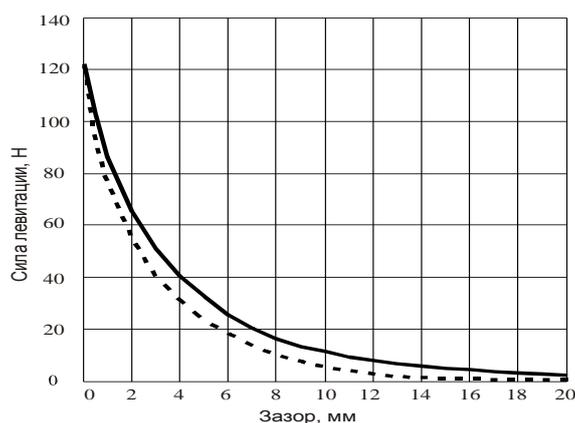


Рисунок 8 - Левитационные характеристики образца Ø36 мм.

2. Устройства на основе ВТСП

На основе полученных монодоменных ВТСП элементов разработаны и исследованы два прототипа магнитных подшипников дискового типа, функционирующие в режиме «fc». Дисковая конструкция опоры позволяет увеличить площадь магнитного взаимодействия между сверхпроводниками и постоянными магнитами и реализовать модульный принцип их построения [9]. Разработан и изготовлен действующий макет роторной системы с двумя ВТСП опорами для гиromоторов космических летательных аппаратов (КЛА). При выбранной компоновке магнитной системы ВТСП элементы массой 180 г обеспечивают устойчивый подвес ротора массой 3,6 кг с рабочим зазором 0,8 мм. Максимальная нагрузочная способность подвеса в радиальном направлении составляет 220 Н, в осевом направлении - 150 Н, радиальная жесткость – 270 Н/мм, осевая жесткость – 224 Н/мм при температуре 77 К. Отношение нагрузочной способности к массе сверхпроводников 120. Максимальная частота вращения ротора - 14500 об/мин; кинетический момент ротора составляет 4,53 Н•м•с при вращении с угловой скоростью 1047 рад/с. Фотографии макета подвеса представлена на рисунке 9.

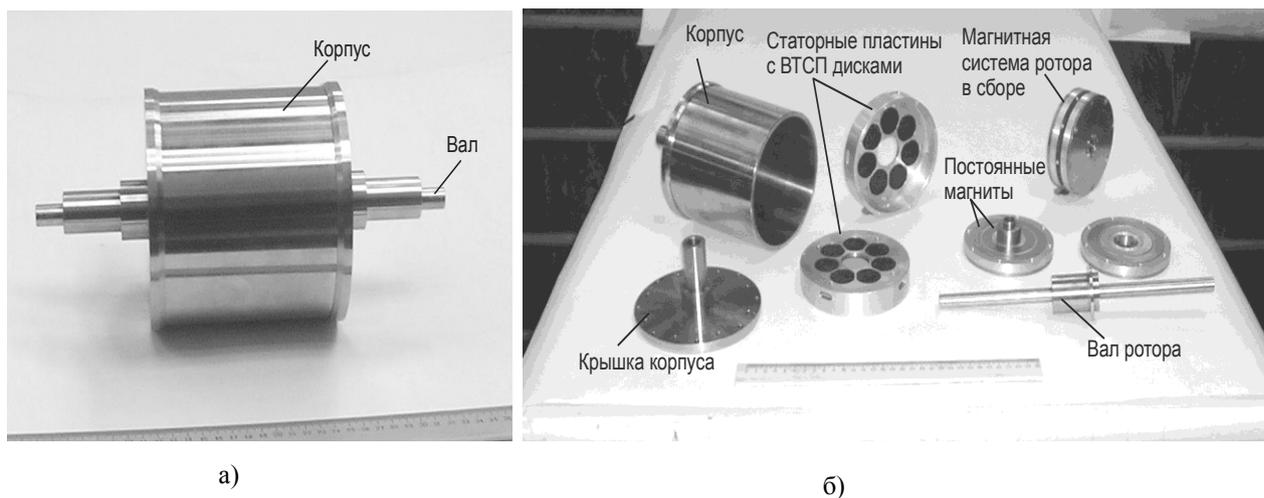


Рисунок 9 - Подвес ротора гиromотора на двух ВТСП опорах.
а) в сборе, б) элементы подвеса

Второй вариант макета подшипника, разрабатываемый для подвеса горизонтальных валов газотурбинных двигателей совместно с Филиалом «МКБ «ГОРИЗОНТ» НПЦ газотурбостроения «Салют», включает три модуля. Для технологической и экспериментальной отработки узлов подшипника выбрана однодисковая конструкция модуля (рисунок 10) и изготовлен его макет на основе Y-Ba-Cu-O керамики.

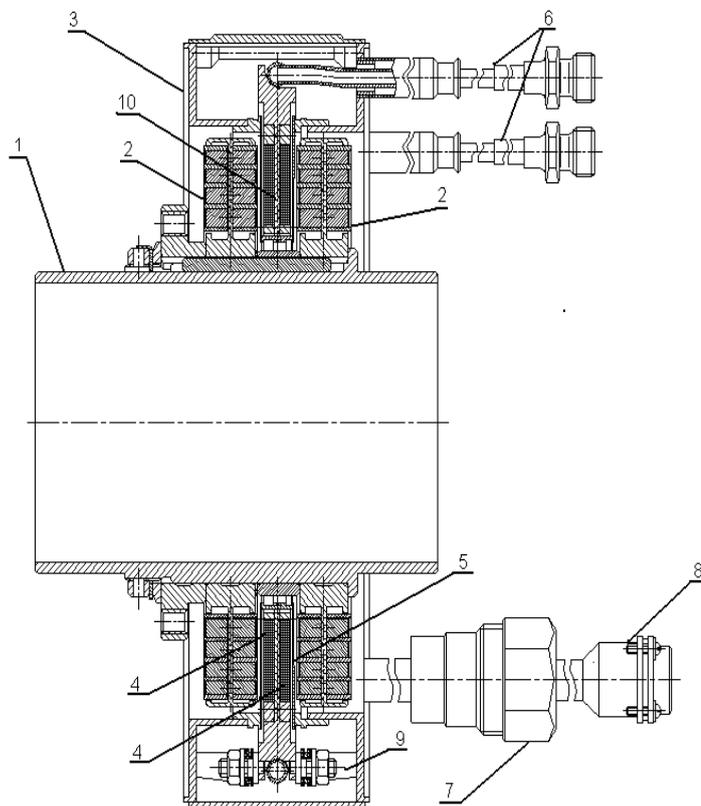


Рисунок 10 - Конструкция модуля дискового ВТСП - подшипника:
 1 – ротор, 2 – магнитный диск, 3 – статор, 4 – ВТСП диски,
 5 – вакуумный кожух, 6 – система отвода тепла, 7 – клапан вакуумной
 откачки,
 8 – термопарный разъем, 9 – тепловой мост, 10 – медная перегородка

Подшипник представляет собой сборку из вращающегося ротора **1** и неподвижного статора **3**. Ротор **1** подшипника представляет собой вал диаметром 100 мм, на котором установлены два диска с Nd-Fe-B магнитами **2**. Диск выполнен с центральной перегородкой **10**, по обеим сторонам которой расположены сегменты магнита, образующие кольцевую структуру, разделённую кольцами из магнитомягкого материала. Статор подшипника состоит из вакуумного кожуха **5**, во внутреннюю полость которого установлен медный диск с ВТСП - элементами **4**, тепловой мост **9**, магистрали охлаждения ВТСП диска жидким азотом **6**, центральной медной перегородки **10**. ВТСП трапецеидальной формы (рисунок

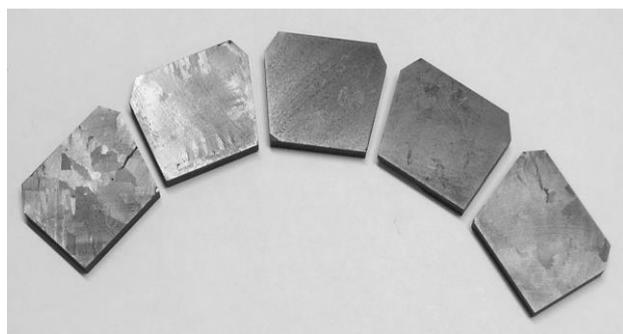


Рисунок 11 - Комплект ВТСП элементов для магнитных опор.
 Толщина 4 мм, площадь 24x28
 мм²

11) монтируются в отверстия медного диска. Внутренняя полость статора после окончания сборки откачивается до давления 1,3 Па.

Статические испытания модуля проводились на экспериментальном стенде, содержащем оборудование для вакуумной откачки, расходную систему подачи жидкого азота, устройства для крепления элементов подшипника и измерения нагрузки (рисунок 12) Подшипник устанавливали на ступе с горизонтальной осью. При проведении статических испытаний нагрузка прикладывалась радиально к ротору, смещения которого фиксировались индикатором перемещений. К ступе стенда прикреплен электродвигатель, который с помощью электромагнитной муфты можно соединить с ротором подшипника. Измеренное значение радиальной жесткости модуля составило 160 Н/мм, При увеличении высоты магнитов в магнитном диске от 4 до 8 мм радиальная жесткость подшипника

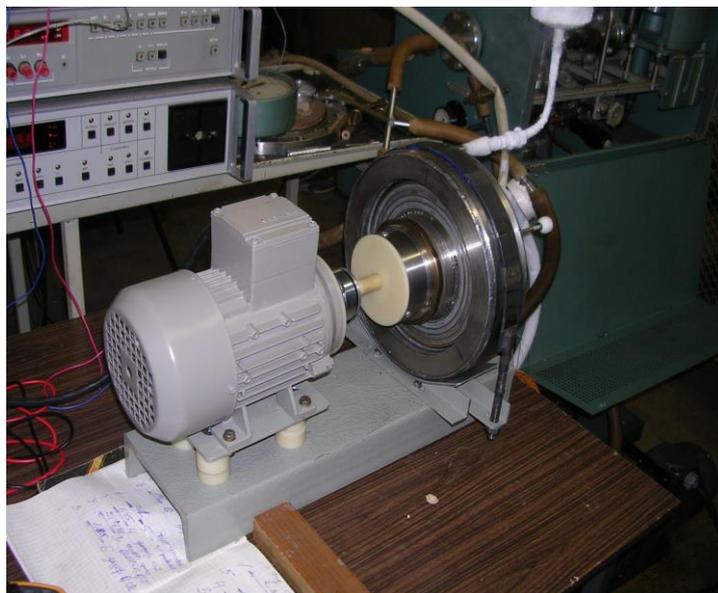


Рисунок 12 – Модуль магнитного подшипника на стенде

увеличилась до 220 Н/мм.

При проведении динамических испытаний модуля подшипника вал ротора раскручен электродвигателем через магнитную муфту до 3000 об/мин. После разгона вал подшипника отсоединяли с помощью магнитной муфты от электродвигателя и ротор вращался до полной остановки в течение 20 мин. Учитывая массу и частоту вращения, накопленная ротором энергия составляет ~260 Дж; средние потери энергии, которые складываются за счет

аэродинамического торможения и потерь энергии из-за неравномерности магнитного поля, составляют $\sim 0,2$ Дж/с.

Заключение

Разработан метод получения длинномерных затравок с регламентированной кристаллографической ориентацией. Изготовлены монодоменные ВТСП диаметром до 48 мм с высокими сверхпроводящими и магнитными характеристиками: Критическая плотность тока 1×10^5 А/см² в нулевом поле. Критическая плотность тока 22000 А/см² в поле 0,4 Тл. Захваченное магнитное поле до 1,2 Тл при $T = 77$ К и 7,2 Тл при $T = 50$ К.

Разработаны конструкции и изготовлены макеты двух магнитных подвесов на ВТСП для гидроприводов КЛА с нагрузочной способностью до 200 Н и частотой вращения до 15 000 об/мин. Разработана конструкция модульного подшипника дискового типа с малым рабочим зазором для горизонтальных валов газотурбинных двигателей. Изготовлен макет отдельного модуля с нагрузочной способностью 220 Н и частотой вращения 3000 об/мин.

Литература

1. M. Morita, S. Takeyashi, M. Tanaka, K. Kimura, K. Miyamoto, K. Sawano, *Adv. Supercond.* 3 (1991) 733
2. W. Lo, D.A. Cardwell, Investigation of the controlled growth of large undoped and Pt-containing YBCO pseudo-crystals // *Materials Science and Engineering*. 1998. B53 p. 45-53
3. Investigations of growth processes in Y-Ba-Cu-O materials by microstructural examination of quenched samples / J D Riches, T Habisreuther, D Litzkendorf, R Muller, W Gawalek // *Supercond. Sci. Technol.*, 2002. V.15 P.499–504).
4. Рост кристаллов и структура иттрий-бариевых сверхпроводников при направленной кристаллизации / О.Л. Полущенко, В.А. Матвеев, Н.А. Нижельский, С.В. Шавкин // *Физика и химия обработки материалов*, 2003, №1, с.77-82
5. C. Leblond, I. Monot J. Provost and G. Desgardin, Optimization of the texture formation and characterization of large size top-seeded-melt-grown YBCO pellets, *Physica C* 232 (1999) 211-222
6. Top-seeded melt growth of Y–Ba–Cu–O superconductor with multiseeding / Jee Y A, Kim C-J, Sung T-H and Hong G-W // *Supercond. Sci. Technol.*, 2000. V.13. P. 195–201.

7. Nizhelskiy N..A. Poluschenko O.L. and Matveev V. A. Employment of Gd–Ba–Cu–O elongated seeds in top-seeded melt-growth processing of Y–Ba–Cu–O superconductors // Superconductor Science and Technology. 2007. V.20. P.81–86
8. Н.А. Нижельский, О.Л. Полущенко, В.А. Матвеев, Патент № 2335037 "Способ изготовления крупных квазиоднокристаллов высокотемпературных сверхпроводников" от 27.09.2007 г.
9. Бесконтактная радиально-упорная опора на высокотемпературных сверхпроводниках. Патент на изобретение № 2270940 от 27.02. 2006г. / О.Л Полущенко, В.Н. Герди, Н.А. Нижельский, В.А. Матвеев, В.И. Львов