

## Формирование искусственных центров пиннинга в ВТСП на основе Вi

И.А.Руднев, П.В.Бобин

Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 115409 Москва, Россия

Б.П. Михайлов

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 119991 Москва, Россия

**Обнаружено, что введение наноразмерных добавок в ВТСП на основе Вi приводит к увеличению намагниченности и плотности критического тока. Впервые установлено, что зависимость нормированного критического тока от объемной концентрации указанных легирующих добавок описывается одной универсальной кривой. Найден диапазон оптимальных объемных концентраций добавок, в котором наблюдается максимальное повышение  $J_c$ .**

Традиционные способы создания повышения плотности критического тока  $J_c$  в ВТСП, такие как, например, облучение высокоэнергетичными ионами или нейтронами, не смотря на их определенные успехи, трудоемки и дороги. Очевидно, требуются другие относительно простые физико-химические методы создания искусственных центров пиннинга. Одним из перспективных с технологической точки зрения методов создания дополнительных центров пиннинга и, следовательно, увеличения транспортных характеристик ВТСП, представляется введение в сверхпроводящий материал наноразмерных добавок (НРД) неорганических материалов. При этом необходим выбор инертных по отношению к сверхпроводящей матрице примесей, которые, с одной стороны, не понижали бы  $T_c$  исходного сверхпроводника, а с другой стороны – при введении в сверхпроводящий материал играли бы роль эффективных центров пиннинга. Известны работы по введению в ВТСП наноразмерных добавок MgO [1], NbC, TaC, TiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, HfN [2-5], в которых была показана возможность повышения  $J_c$  сверхпроводящих соединений (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+x</sub> (Bi2212) и (Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+x</sub> (Bi2223).

В настоящем сообщении приводятся впервые полученные данные по существенному увеличению намагниченности как при гелиевой, так и азотной температурах, поликристаллических ВТСП образцов за счет введения наноразмерных добавок карбида тантала, карбида ниобия и нитрида ниобия. Наблюдаемое увеличение намагниченности  $M$ , согласно модели критического состояния, означает увеличение плотности критического тока и свидетельствует об образовании в материале эффективных искусственных центров пиннинга.

Исходное висмутсодержащее соединение Bi-2223 приготовлено методом совместного осаждения карбонатов. По данным РФА порошок синтезированного соединения преимущественно состоит из фазы 2223 (90 об.%), 2212 (5÷10 об.%), 2201 (2÷3 %) и следов PbCaO<sub>4</sub>. Для создания искусственных центров пиннинга применены мелкодисперсные

порошки NbN, TaC, NbC (с характерным размером гранул 10÷30 нм). Весовые концентрации добавок составляли от 0.05 до 0.2 %. Смесь порошков фазы 2223 и наноразмерных частиц перемешивали во вращающемся контейнере в течение 30 часов и затем проводили холодное прессование в таблетки диаметром 8 мм и толщиной 2 мм. Давление прессования во всех компактируемых таблетках было одинаковым и равнялось 100 кг/см<sup>2</sup>. Последующее высокотемпературное спекание таблеток разного состава, в том числе и образца без добавок, проводилось одновременно. Спекание осуществлялось при температуре 840 °С в течение 10 часов.

Для регистрации намагниченности применялся метод дифференциальной холловской магнитометрии, который заключается в использовании двух полупроводниковых преобразователей Холла (ПХ), включенных встречно относительно холловских потенциальных выводов. Первый ПХ находился вдали от образца и измерял внешнее магнитное поле  $H$ , а второй располагался на поверхности образца и измерял магнитную индукцию. В результате аппаратного вычитания холловского потенциала первого ПХ из значения потенциала второго ПХ, возникал суммарный сигнал, соответствующий намагниченности  $M(H)$ .

Измерения проводились при  $T=77$  К и  $T=4.2$  К. В первом случае в качестве источника внешнего магнитного поля использовался резистивный медный соленоид, во втором случае применялся сверхпроводящий соленоид из NbTi.

На рис.1 представлены характерные петли намагниченности  $M(H)$  образцов Bi-2223, содержащими наноразмерные добавки NbC с различными весовыми концентрациями  $C=0$  (нелегированный образец); 0.05 масс %, 0.1 масс %, 0.2 масс %. Видно, что введение добавок приводит к росту значения намагниченности во всем диапазоне исследованных магнитных полей. Увеличение ширины петли намагниченности  $\Delta M$ , означает, согласно модели критического состояния, увеличение  $J_c$ . За ширину петли намагниченности принимаем  $\Delta M(H_o) = M_+(H_o) - M_-(H_o)$ , где  $M_+(H_o)$  – значение намагниченности в увеличивающемся поле  $H_o$ ,  $M_-(H_o)$  – в уменьшающемся. Аналогичные результаты были получены также для добавок NbN и TaC. Значения плотности критического тока рассчитывались по формуле  $j_c(H_o) = 15\Delta M(H_o)/R$ , учитывающей размагничивающий фактор и зависимость критического тока от магнитного поля.

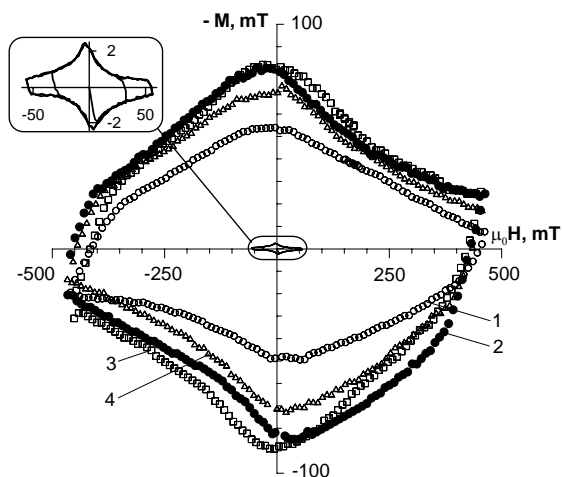


Рис.1. Намагниченность  $M(H)$  при  $T=4.2$  К  $\text{Bi2223}$  с различными массовыми концентрациями наноразмерных добавок NbC: 1- нелегированный; 2-  $\text{Bi2223} + 0.05$  масс. % NbC; 3-  $\text{Bi2223} + 0.1$  масс. % NbC; 4-  $\text{Bi2223} + 0.2$  масс. % NbC. Сплошная линия и на вставке – зависимость  $M(H)$  при  $T=77$  К для нелегированного образца.

При увеличении температуры до  $T=77$  К наблюдается изменение формы петли намагниченности и резкое уменьшение значения  $\Delta M$ . Для наглядной иллюстрации уменьшения намагниченности при повышении температуры, на рис.1 вместе с данными при  $T=4.2$  К представлена кривая  $M(H)$  при  $T=77$  К для нелегированного образца. Следует отметить, что рост  $J_c$  наблюдается как при азотной температуре, так и при  $T=4.2$  К.

Увеличение намагниченности означает, что вводимые добавки приводят к образованию дополнительных структурных дефектов, играющих роль искусственных центров пиннинга. Для оптимизации концентрации добавок, приводящей к максимальному росту  $J_c$ , необходимо проанализировать зависимости  $J_c$  от объемной концентрации структурных дефектов  $n$ , т.е. от числа центров пиннинга в единице объема сверхпроводника. Несмотря на то, что массовая концентрация различных добавок варьировалась в одинаковых пределах от 0.05 до 0.2 масс. %, объемная концентрация примесей существенно различается, так как различны плотности легирующих добавок при одинаковом среднем поперечном размере наночастиц. Объемная концентрация частиц была рассчитана, исходя из характерного поперечного размера частицы в 20 нм и плотностей легирующих веществ - NbN :  $\rho \approx 8.4$  г/см<sup>3</sup>; -NbC :  $\rho \approx 8.0$  г/см<sup>3</sup>; - TaC :  $\rho \approx 14.4$  г/см<sup>3</sup>.

На рис. 2 представлена зависимость критического тока при  $T=4.2$  К, нормированного на максимальную величину, от концентрации добавок (центров пиннинга) различных легирующих веществ. Кривая имеет универсальный куполообразный характер с максимумом в диапазоне  $n \approx 6 \div 7 \cdot 10^{13}$  частиц /см<sup>3</sup>.

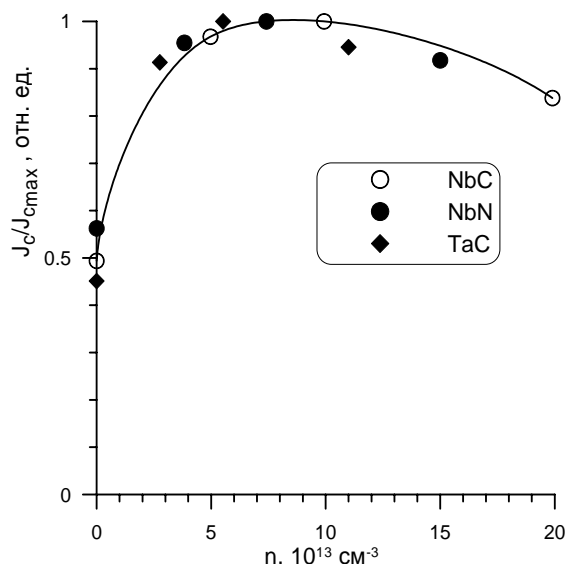


Рис.2. Зависимость нормированной плотности критического тока от объемной концентрации различных легирующих добавок.

Таким образом, в результате проведенных исследований намагниченности образцов ВТСП  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  при различных содержаниях наноразмерных добавок карбида тантала, карбида ниобия и нитрида ниобия, впервые обнаружено, что наноразмерные добавки приводят к резкому увеличению намагниченности. Это, в свою очередь, означает повышение плотности критического тока. Наиболее заметное повышение плотности критического тока зарегистрировано при введении добавки TaC. В нулевом поле повышение  $J_c$  составило 120 % при  $T=4.2$  К и 100 % при  $T=77$  К. Максимальное повышение критического тока на 290% отмечено при  $T=77$  К в магнитном поле 40 мТл. Анализ зависимостей нормированного критического тока от объемной концентрации частиц указывает на существование универсальной кривой  $J_c(n)$ , имеющей экстремум в области оптимальной концентрации наноразмерных добавок  $n_{opt} \approx 6 \div 7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Использование универсальной кривой  $J_c(n)$  открывает путь к прогнозированию оптимальных весовых концентраций наноразмерных добавок иных материалов, исходя из плотности используемого вещества и его дисперсности.

1. Ленников В.В., Казин П.Е., Путляев В.И. и др. ЖНХ 41, 911(1996).

2. Михайлов Б.П., Казин П.Е. и др. Неорганические материалы 37, 753(2001).

3. Михайлов Б.П., Бурханов Г.С. и др. Неорганические материалы 37, 1199(2001).

4. Mikhailov V.P., Tazetdinova N.F. et al. J. Low Temp. Phys. 105, 1553(1996).

5. Михайлов Б.П., Бурханов Г.С. и др. Неорганические материалы 39, 462(2003).