

Магнитные и левитационные свойства монокристаллических сверхпроводников Y-Ba-Cu-O

И.А. Руднев, Ю.С. Ермолаев

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

О.Л. Полущенко, Н.А. Нижельский, В.А. Матвеев

Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана, 107005 Москва, Россия

Левитационные и магнитные характеристики ВТСП материалов имеют определяющее значение при конструировании большинства устройств и механизмов, в основе функционирования которых лежат эффекты сверхпроводимости, таких как бесконтактные пассивные магнитные подвесы, магнитные демпферы, накопители энергии, левитирующие транспортные средства. Сверхпроводниковые элементы в подобных устройствах работают при охлаждении в магнитном поле (FC) или в отсутствие магнитного поля (ZFC). Режим FC используется при необходимости получения устойчивого позиционирования узлов механического устройства (например, ротора подшипника) в пространстве, в демпфирующих устройствах. ZFC режим применяют в случаях, когда необходимо обеспечить максимальную подъемную силу, например,

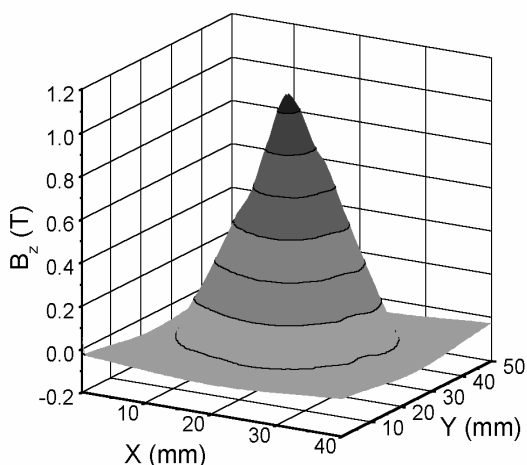


Рис. 1. Распределение поля над поверхностью образца $\varnothing 29$ мм и высотой 14 мм.
 $T = 77\text{K}$.

в транспортных системах на сверхпроводящем подвесе. Возможно также комбинированное использование сверхпроводников с FC и ZFC режимами охлаждения.

В данной работе проведено исследование левитационных характеристик монокристаллических образцов ВТСП при взаимодействии их с постоянным магнитом в режимах ZFC и FC. Знание взаимозависимости левитационных и магнитных характеристик ВТСП дает возможность выбора сверхпроводникового материала, параметров магнитной системы и компоновки устройства.

Образцы $\varnothing 29$ мм и высотой до 14 мм изготавливали методом направленной кристаллизации с использованием затравок $\text{Sm}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Прекурсоры получали по керамической технологии, используя в качестве исходного материала порошок состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + 25\%$ мол. $\text{Y}_2\text{O}_3 + 1\%$ вес. CuO_2 . Варьированием технологических параметров получены объемные квазимонокристаллы с различной силой пиннинга магнитного потока и соответственно величиной захваченного магнитного поля.

Величину захваченного магнитного потока измеряли путем автоматического сканирования датчиком Холла поверхности образца, охлажденного в магнитном поле 1,5 Тл до температуры 77 К. Суммарный зазор между шлифованной поверхностью образца и активной зоной датчика Холла составлял 0,8 мм, включая толщину датчика 0,5 мм.

Распределение поля над поверхностью образца (рис.1) осесимметрично, непрерывно и не имеет провалов, что указывает на однородность, отсутствие трещин, слабых связей и его квазимонокристаллическую структуру. Исследования левитационных характеристик проведены на автоматизированном стенде, предназначенном для измерения силы магнитной левитации (силы взаимодействия между сверхпроводником и магнитом) в зависимости от расстояния между ВТСП образцом и постоянным магнитом (ПМ). ВТСП образец помещается в азотный криостат, который закреплен на платформе вертикального и горизонтального перемещения относительно неподвижного постоянного магнита. Сила взаимодействия регистрируется с помощью промышленного тензодатчика, совмещенного с ЖК индикатором силы и интерфейсом к компьютеру. Охлаждение сверхпроводника возможно как в нулевом, так и в магнитном поле. В работе использовался постоянный магнит NdFeB с диаметром $D=25$ мм, высотой $h=12$ мм и максимальной индукцией на поверхности $B \approx 0,4$ Тл. Основные характеристики измерительной системы: диапазон измерения силы до 147 Н, чувствительность измерения силы $1 \cdot 10^{-2}$ Н, погрешность измерения силы 1%, дискретность перемещения 4 шага на мм, амплитуды перемещения по горизонтали и вертикали до 100 мм. Подробное описание системы приведено в [1].

На рис.2 и рис.3 представлены характерные зависимости силы магнитной левитации от левитационного зазора $F_z(z)$ для образца D27, имеющего значение захваченного магнитного потока $B_{\text{max}}=1,23$ Тл. Рисунок 2 соответствует режиму охлаждения в нулевом магнитном поле, рис.3 – ре-

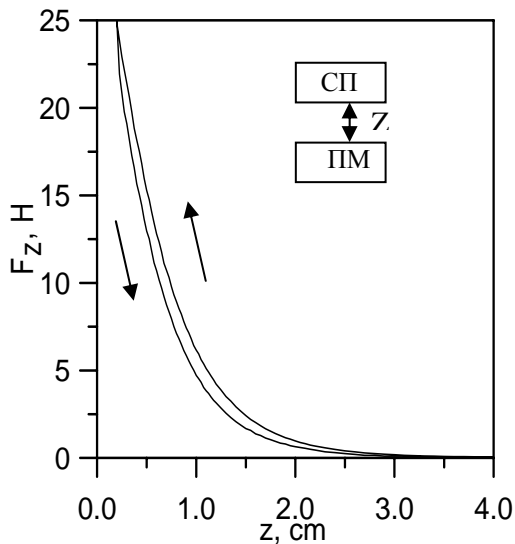


Рис. 2. Зависимость $F_z(z)$ для образца с $B_{\max}=1,23$ Тл. $T=77$ К. Режим охлаждения ZFC. На вставке – геометрия измерений.

жиму охлаждения в магнитном поле. Режим ZFC обеспечивался за счет охлаждения ВТСП образца на расстоянии $z=10$ см между сверхпроводником и постоянным магнитом. В режиме FC расстояние z равнялось минимальному возможному значению для данной измерительной системы 2 мм.

Максимальная сила магнитной левитации $F_{\max}=25$ Н (при значении $z=2$ мм) достигается в режиме ZFC. При всех z значение силы F_z положительно, что означает наличие отталкивания во всем диапазоне расстояний. При охлаждении в поле картина взаимодействия меняется. Во время первого отвода ВТСП от магнита наблюдаются отрицательные значения силы, что означает притяжение. Физически притяжение возникает из-за того, что в режиме FC ВТСП образец захватывает магнитный поток и становится магнитом захваченного потока. А так как направления полярностей у ПМ и магнита захваченного потока совпадают, имеет место притяжение. При последующем уменьшении расстояния z наблюдается сильный гистерезис, на расстоянии $z \approx 6$ мм притяжение сменяется отталкиванием с максимальным значением $F_z \approx 4$ Н. Дальнейшее циклирование (увеличение-уменьшение расстояния) приводит к замкнутой петле $F_z(z)$.

Гистерезис кривой $F_z(z)$ также наблюдается для режима ZFC (см. рис. 2). На рис.4 представлена зависимость от z ширины петли гистерезиса $\Delta F(z_0)=F_-(z_0)-F_+(z_0)$, где $F_-(z_0)$ и $F_+(z_0)$ значения силы магнитной левитации соответственно при уменьшении и увеличении расстояния z . Вместе с кривой $\Delta F(z)$ на рис.4. приведена зависимость относительного значения ширины петли гистерезиса $\Delta F/F(z)$. Видно, что максимальное значение $\Delta F=2,5$ Н достига-

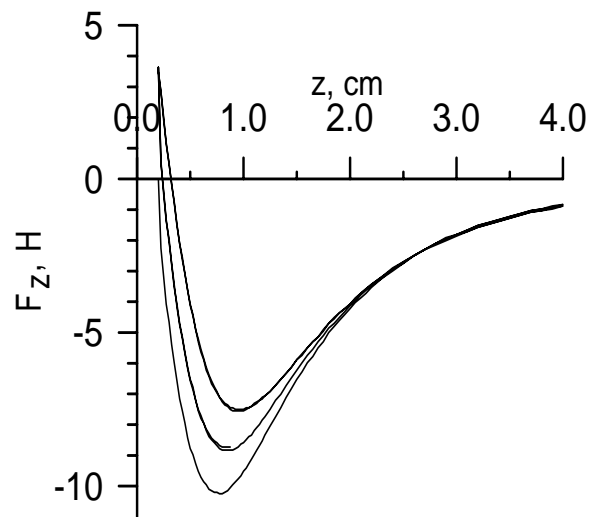


Рис.3. Зависимость $F_z(z)$ для образца с $B_{\max}=1,23$ Тл. $T=77$ К. Режим FC.

ется при $z=5$ мм, в то время как максимум величины $\Delta F/F=0,5$ наблюдается при $z=3$ см.

Таким образом, результаты, представленные в данном сообщении демонстрируют возможность

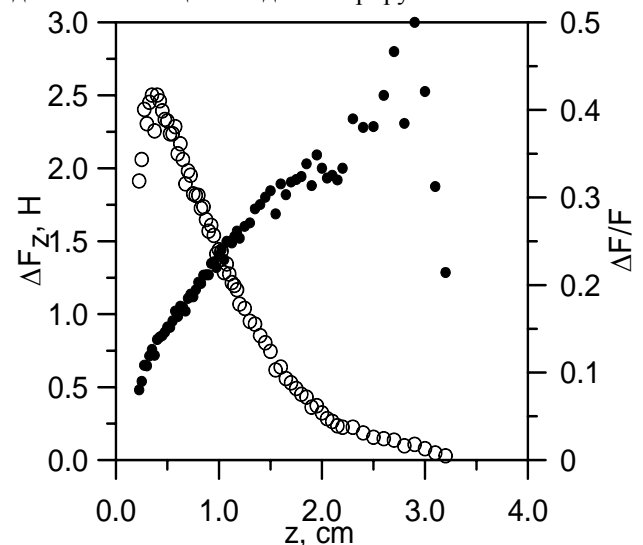


Рис.4. Ширина гистерезиса ΔF_z (открытые символы) и величина $\Delta F/F$ (закрытые символы) в зависимости от левитационного зазора. Режим ZFC.

использования массивных ВТСП образцов в системах магнитных подвесов. Максимальная сила магнитной левитации наблюдается при охлаждении в нулевом поле, в то время как, охлаждение в режиме FC приводит к лучшей устойчивости магнитных подвесов.

1. Ю.С. Ермолаев, И.А. Руднев, ПТЭ 167(2004).