

ПРОЯВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ХАРАКТЕРА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ BiSrCaCuO (2212) В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ПОГЛОЩЕНИИ

К.В.Багинский, В.А.Березин, С.А.Говорков, В.А.Тулин

Институт проблем проблем технологий микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432 Черноголовка, Московской обл., Россия

Поступила в редакцию 24 февраля 1994 г.

После переработки 1 июня 1994 г.

Экспериментально изучено поглощение высокочастотной электромагнитной мощности ($f \approx 700$ МГц) в монокристаллах BiSrCaCuO вблизи температуры сверхпроводящего перехода T_c в магнитном поле. В области малых магнитных полей ниже T_c обнаружено дополнительное поглощение, связанное с джозефсоновской компонентой вихревых нитей в исследуемом монокристалле.

Высокотемпературные металлооксидные сверхпроводники представляют собой сильно анизотропные среды относительно электромагнитных свойств. Эта анизотропия связана с наличием одной или нескольких меди-кислородных плоскостей в элементарной ячейке, являющихся основным электропроводящим элементом (слоем) и различной для разных соединений межплоскостной проводимостью. Монокристаллы BiSrCaCuO обладают резко выраженной анизотропией электрических свойств и поэтому представляют большой интерес с точки зрения изучения слоистых сверхпроводящих систем [1-3].

По современным представлениям вихревая линия в слоистых сверхпроводниках представляет собой чередование точечно-подобных вихрей в отдельном слое (панкейков), связанных или магнитным взаимодействием в случае магнитного поля, перпендикулярного слоям, или отрезками джозефсоновских вихрей в межслоевом пространстве в наклонном магнитном поле [4]. В параллельном магнитном поле вихревая нить состоит только из джозефсоновской компоненты. Двумерный характер сверхпроводимости в первую очередь связывается с существованием термически возбужденных пар вихрь - антивихрь, на фоне которых развивается фазовый переход Березинского - Костерлица - Таулиса (БКТ)[5, 6].

Исследуемые образцы представляли собой монокристаллы $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1,7}\text{Ca}_{1,3}\text{Cu}_2\text{O}_8$ с геометрическими размерами порядка $1 \times 1 \times 0,1$ мм. Ось с направлена вдоль минимального размера, перпендикулярно плоскости кристалла.

Измерение поглощения осуществлялось на частоте $600 \div 1000$ МГц. Образец размещался в спиральном резонаторе, диаметр которого был близок к размеру образца. Связь со спиральным резонатором осуществлялась с помощью коаксиальных кабелей подведением центрального проводника к торцу спирали. Спираль выполнялась из медной проволоки. Образец размещался внутри спирали в вертикальной плоскости (ось с направлена горизонтально). Все это находилось в азотном криостате, между полюсами электромагнита. Вращая электромагнит, можно было менять ориентацию магнитного поля относительно плоскости ab образца от параллельной до перпендикулярной.

На рис.1 представлена зависимость поглощенной в резонаторе с образцом мощности от температуры. В области температур $120 \div 40$ К имеется достаточно

сильная зависимость от температуры удельного сопротивления меди, из которой выполнены все элементы резонатора. На рисунке отчетливо виден связанный с этой зависимостью ход, и на его фоне максимум поглощения несколько ниже температуры перехода T_c , измеренной по исчезновению магнитополевой зависимости поглощения.

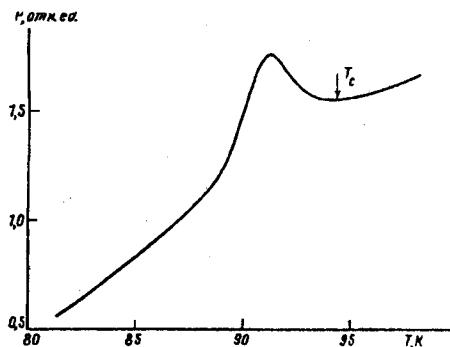


Рис.1

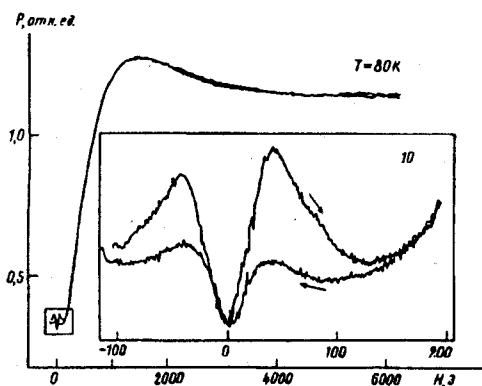


Рис.2

Рис.1. Температурная зависимость поглощения медного спирального резонатора с монокристаллом BiSrCaCuO в районе сверхпроводящего перехода. Стрелкой обозначена T_c .

Рис.2. Зависимость поглощения ВЧ мощности монокристаллом BiSrCaCuO от магнитного поля. На вставке зависимость поглощения ВЧ мощности в увеличенном масштабе от магнитного поля в малых магнитных полях. Стрелками указано направление развертки поля

Рис.2 демонстрирует характер зависимости поглощения от магнитного поля, направление магнитного поля в данном случае составляет с плоскостью кристалла угол 12° . На этом рисунке проявляются два максимума поглощения: один в магнитном поле в районе $1,5\text{ кЭ}$, второй – в поле около 20 Э . Масштаб большего максимума соответствует величине изменения поглощения в максимуме на температурной зависимости. Его положение по магнитному полю при изменении ориентации определяется величиной проекции поля на ось с кристалла. Второй максимум значительно меньше. На вставке рис.2 он представлен в увеличенном масштабе. Видно, что это – некоторое дополнительное поглощение в малых магнитных полях, и часть его или оно все отсутствует в нулевом магнитном поле. Поглощение нарастает при увеличении магнитного поля от $H = 0$, проходит через максимум и затем подавляется полем при его увеличении. Амплитуду этого поглощения мы оценивали по глубине минимума в нулевом поле. Наблюдается гистерезис поглощения при изменении направления развертки поля. Указанное поглощение возникает после перехода в сверхпроводящее состояние. Его максимальная амплитуда наблюдается при $T = 88\text{ К}$ (при $T_c = 94,5\text{ К}$). При дальнейшем понижении температуры амплитуда медленно падает. Исследование этого поглощения при различных ориентациях магнитного поля относительно $\text{Си}-\text{О}-$ плоскостей показало, что оно максимально, когда поле параллельно плоскостям ab , и убывает при отклонении от параллельности, имея минимальную амплитуду при H , параллельном оси c (точно параллельно оси c в нашей геометрии выставить H невозможно).

На рис.3 представлены несколько полевых зависимостей поглощения для ориентации H параллельно плоскости ab при различных температурах (запись осуществлялась в одну сторону – слева направо). Стрелками на рисунке обозначены относительные минимумы поглощения, абсциссе которых мы условно принимаем за граничное поле подавления дополнительного поглощения. Видно, что это поле монотонно растет при уменьшении температуры от T_c .

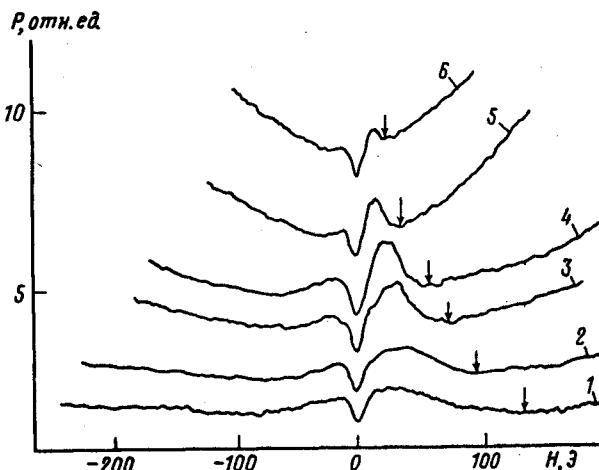


Рис.3. Зависимость поглощения ВЧ мощности от магнитного поля при различных значениях температуры: кривая 1 – $T = 79,8$; 2 – 84,7; 3 – 87,8; 4 – 88,3; 5 – 90,6; 6 – 91,2 К. Стрелками обозначены относительные минимумы поглощения

В работе [7] максимум, аналогичный максимуму поглощения на температурной зависимости (рис.1), и его отражение в полевых зависимостях наблюдались в тонких алюминиевых пленках вблизи T_c в частотном диапазоне $30 \div 1000$ МГц, и там было показано, что его происхождение связано с изменением характера ВЧ поглощения при изменении прозрачности пленки по отношению к нормальной компоненте ВЧ поля. Хотя импеданс пленки меняется монотонным образом, вблизи T_c в области резкого изменения импеданса будет наблюдаться максимум поглощения. Проявлением этого является максимум поглощения на температурной зависимости (рис.1) и максимум поглощения в больших полях (рис.2). Таким образом, слоистая структура монокристалла BiSrCaCuO (2212) проявляется здесь косвенным образом в виде большой глубины проникновения ВЧ магнитного поля перпендикулярного слоям.

Значительно более интересно дополнительное погложение в малых полях (рис.3). Структура вихревой системы в слоистых сверхпроводниках может изменяться с ростом магнитного поля. С одной стороны, связанные пары (БКТ-фаза) подавляются магнитным полем. Однако существование дополнительного поглощения в широком интервале температур отрицает возможность связи его с вихревыми кольцами. С другой стороны, малость критического то-ка, параллельного оси c , говорит о слабости межслоевой сверхпроводимости и о возможности разрушения структуры джозефсоновских вихрей в сравнительно слабых магнитных полях. В этом случае угловая зависимость интенсивности дополнительного поглощения определяется длиной отрезков джозефсоновских вихрей, которая уменьшается с увеличением угла отклонения поля от плоскости ab . К сожалению, неопределенность в фиксации границы существования дополнительного поглощения и сильное полевое изменение базового поглощения при заметном отклонении поля от плоскости ab не дает возможности

исследовать полно угловую зависимость поля подавления дополнительного поглощения, которое по нашим представлениям является вторым критическим полем для межслоевой сверхпроводимости.

Экспериментальные результаты определяют два граничных значения магнитного поля: первое поле – $H_c^1 \approx 10$ Э; в полях меньше H_c^1 кривая поглощения обратима, и второе поле – $H_c^2 \approx 200$ Э, выше которого дополнительное поглощение отсутствует, исчезает характерный гистерезис. Поле H_c^1 определяет область образования первого ряда вихрей. При однородном вдоль оси с проникновении магнитного поля величина H_c^1 позволяет оценить размер вихря в плоскости ab перпендикулярно магнитному полю:

$$d = \Phi_0 / H_c^1 s,$$

где Φ_0 – квант магнитного потока и s – период слоев Cu-O вдоль оси с. В нашем случае оценка дает $d \approx 1$ мм при $T = 80$ К, что соответствует размеру образца.

При увеличении поля выше H_c^1 вихри в межслоевом пространстве уплотняются и в поле H_c^2 структура вихрей исчезает. Поэтому поле H_c^2 дает возможность оценить минимальный размер вихря (размер его кора):

$$d_{min} = \Phi_0 / H_c^2 s \approx 50 \text{ мкм}.$$

Из этих размеров можно грубо оценить плотность критического тока Джозефсона:

$$I_J \approx c\Phi_0 / 4\pi d_{min} s \approx 3 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2.$$

Таким образом, исходя из магнитополевой и угловой зависимостей, можно сделать вывод, что дополнительное поглощение в малых магнитных полях в монокристаллах BiSrCaCuO определяется джозефсоновской компонентой вихрей магнитного потока, которая является следствием слоистого характера сверхпроводящих свойств исследуемого материала.

Работа выполнена в рамках проекта 92122 Совета по ВТСП РАН и при индивидуальной поддержке одного из авторов (ТВА) со стороны ISF. Авторы выражают глубокую благодарность А.С.Нигматулину и Д.А.Шулятьеву за любезно предоставленные кристаллы.

-
1. S.Martin, A.T.Fiory, R.M.Fleeming et al., Phys. Rev. Lett. **60**, 2194 (1988).
 2. T.T.M.Palestra, B.Batalog, L.F.Schneemeyer et. al., Phys. Rev. B **38**, 5102 (1988).
 3. S.Martin, A.T.Fiory, R.M.Fleeming et al., Appl. Phys. Lett. **54**, 72 (1989).
 4. В.Л.Березинский, ЖЭТФ **59**, 907 (1970).
 5. Т.М.Kosterlitz and D.J.Thouless, J.Phys. C**6**, 1181 (1973).
 6. J.R.Clem, Phys. Rev. B **43**, 7837 (1991).
 7. С.А.Говорков, С.К.Толпыго, В.А.Тулин, ЖЭТФ **89**, 1704 (1985).