

Высокочастотное поглощение в сильно анизотропных, слоистых сверхпроводниках и взаимодействие вихрей магнитного потока

В. А. Тулин, В. А. Березин

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Одним из интересных свойств сверхпроводников является поведение магнитного потока в материале. Магнитный поток в сверхпроводниках второго рода, к которым относятся и высокотемпературные сверхпроводники, существует в виде отдельных квантованных вихрей. Если через сверхпроводник, помещенный в магнитное поле, при котором имеет место вихревая структура, пропускать электрический ток, то под действием силы Лоренца вихри придут в движение. При этом движении возникают диссипативные потери, которые характеризуются сопротивлением течения потока ρ_f .

В работе Горькова и Копнина [1] было показано, что действительная часть импеданса сверхпроводника второго рода (величина, характеризующая отклик материала на облучение высокочастотным магнитным полем) в диапазоне поля $H_{c1} \ll H \ll H_{c2}$ определяется величиной ρ_f через выражение

$$\operatorname{Re}Z = (2\pi\omega\rho_f/\mu c^2)^{1/2},$$

где $\mu = V/H$, H – внешнее магнитное поле. Высокочастотный импеданс, как и ρ_f , характеризует динамику вихрей магнитного потока.

В сильно анизотропных, слоистых высоко температурных сверхпроводниках вихревая структура представляется двумя типами вихрей, свойства которых заметно отличаются. Внутренний магнитный поток, перпендикулярный сверхпроводящим слоям, образуется из точечных вихрей, аналогичных вихрям Пирла в тонких пленках. Эти вихри объединяются в цепочки, перпендикулярные слоям, и в совокупности они подобны вихрям Абрикосова в обычных сверхпроводниках. Параллельный слоям магнитный поток формируется из джозефсоновских вихрей, аналогичных вихрям в джозефсоновских туннельных переходах, параллельных обкладкам перехода. Взаимодействие между этими вихрями и образование композитных вихрей, содержащих отрезки вихрей обоих сортов, приводит к сложной богатой динамике магнитного потока в сильно анизотропных, слоистых сверхпроводниках [2].

Мы изучали изменение активной части поверхностного импеданса сильно анизотропного, слоистого сверхпроводника BiSSCO (2212) в зависимости от магнитного поля в диапазоне температур от 4,2 до 100 К. Измерения производились на частоте в диапазоне 500 – 1000 МГц. Мы наблюдали изменение ВЧ поглощения (пропорциональное активной компоненте импеданса), связанное с вхождением в образец магнитного потока, параллельного сверхпроводящим слоям, и по его поведению делали вы-

воды о динамике и взаимодействии вихрей различного типа.

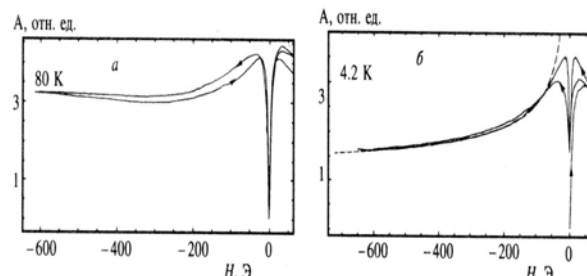


Рис.1. Зависимость ВЧ поглощения в BiSSCO от магнитного поля: а - температура 80К, б - 4,2К.

На рис.1 показан характерный вид зависимости активной части импеданса образца от магнитного поля, параллельного сверхпроводящим слоям (плоскости образца) для двух температур: вблизи T_c и 4,2 К. Такой характер поглощения наблюдается во всех образцах, при этом заметным образом меняется значение магнитного поля максимума поглощения.

При высокой температуре легко наблюдать влияние на указанное поглощение перпендикулярного магнитного потока. Для этого можно наблюдать угловую зависимость поглощения при малых наклонах магнитного поля относительно плоскости образца. Уже сравнительно небольшое количество перпендикулярных вихрей ($\varphi \approx 1^\circ$) приводит к значительному уменьшению поглощения, связанного с параллельными вихрями [3].

Чтобы наблюдать взаимодействие вихрей в более широком диапазоне температур, была применена следующая методика измерений. При медленном (естественном или с дополнительным тепловыделением) отогреве образца от 4,2 К магнитное поле непрерывно сканировалось между значениями $-H_0$, $+H_0$. За время отогрева от 4,2 до 90 К осуществлялось несколько десятков сканирований. Проходя при сканировании характерный участок (максимум поглощения), можно было практически непрерывно проследить за его изменением с температурой. Мы наблюдали за амплитудой максимума поглощения (магнитопоглощение) в параллельном сверхпроводящим слоям магнитном поле и влияние на него перпендикулярного магнитного потока в образце.

На рис. 2 представлены зависимости высокочастотного магнитопоглощения от температуры при медленном нагреве образца.

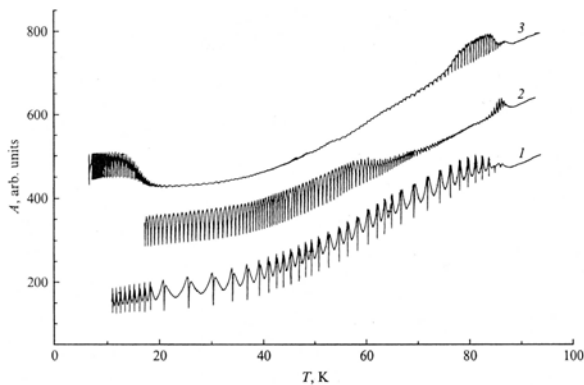


Рис.2. Температурная зависимость магнитопоглощения. 1 – $H \parallel ab$, меняется от -1 до 1 кЭ. 2 – угол между H и плоскостью ab равен 45° , поле меняется от -200 до 200 Э. 3 – замороженное перпендикулярное поле равно 9 Э, параллельное поле меняется от -200 до 200 Э.

Кривая 1 соответствует отсутствию перпендикулярного магнитного потока. Образец охлаждался до температуры $4,2$ К, затем начинался отогрев и включалось сканирование параллельного магнитного поля. При прохождении одного периода магнитного поля можно видеть изменение поглощения идентичное изображенному на рис. 1. Амплитуда изменения поглощения при каждом сканировании мало зависит от температуры во всем диапазоне за исключением области температуры вблизи критической. Кривая 2 соответствует сканированию магнитного поля, направленного под углом 45° по отношению к плоскости образца. В этом варианте при низкой температуре вследствие большого поверхностного барьера перпендикулярный магнитный поток не проникает в образец, и наблюдается поглощение, связанное с проникновением параллельного магнитного потока. При температуре около 60 К начинается проникновение перпендикулярного магнитного потока, который подавляет поглощение, связанное с параллельным потоком. В окрестности 80 К это поглощение подавлено практически полностью, и при приближении к T_c возникает поглощение, связанное с изменением полного магнитного потока в образце.

Кривая 3 получена аналогично кривой 1. Сканировалось параллельное поле от -200 до 200 Э, но при наличии замороженного перпендикулярного магнитного потока. Если сравнить кривую 1 (рис. 2) с кривой 3, видно, что замороженный поток подавляет поглощение, связанное с параллельным потоком. Масштаб этого подавления сильно отличается для температур выше и ниже T^* (15 К). На рис. 3 изображены зависимости амплитуды максимума поглощения, связанного с параллельным потоком, от величины замороженного перпендикулярного поля. Для температуры выше T^* поле порядка 1 Эрстеда практически полностью подавляет поглощение. В то же время величина замороженно-

го поля подавления при температуре ниже T^* на два порядка выше. Это довольно неожиданный результат. Дело в том, что подвижность вихрей магнитного потока должна уменьшаться при понижении температуры, так как она связана с преодолением вихрями потенциальных барьеров. Результаты же исследования ВЧ поглощения показывают обратное. Это может означать, что при температуре T^* меняется характер взаимодействия вихрей магнитного потока различного типа.

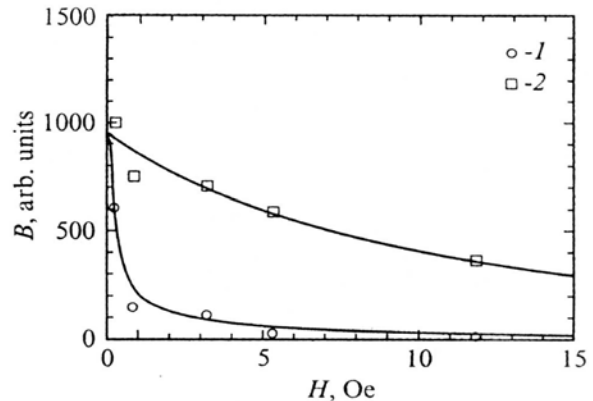


Рис.3. Подавление ВЧ магнитопоглощения замороженным магнитным полем, параллельным оси с. 1 – $T > T^*$, 2 – $T < T^*$.

Можно представить вихри, параллельные сверхпроводящим слоям, в виде струны, обладающей линейным натяжением. Вихрь – струна взаимодействует с дефектами материала и с перпендикулярными вихрями. Если вихри закреплены на «дефектах», то под действием высокочастотного тока вихри будут изгибаться в виде дуги. Под «дефектами» мы подразумеваем и перпендикулярные вихри. Поглощение будет пропорционально площади, занимаемой вихрем за период действия ВЧ поля. Эта площадь пропорциональна квадрату расстоянию между точками закрепления, т. е. концентрации центров пиннинга. В случае отталкивания от «дефектов» площадь будет пропорциональна расстоянию между ними, а поглощение пропорционально корню квадратному из их концентрации. При той же самой концентрации «дефектов» поглощение во втором случае будет гораздо больше, чем в первом. Выше T^* вихри разного сорта притягиваются друг к другу и образуют комбинированные вихри[2], а ниже возникает отталкивание между вихрями разного сорта, и они образуют систему взаимопроникающих решеток.

1. Л. П. Горьков, Н. Б. Копнин, УФН 116, 413 (1975).
2. А.Е. Koshelev, Phys. Rev. B 68, 094520 (2003).
3. В. А. Березин, В. А. Тулин, ЖЭТФ 110, 1054 (1996).