

ПОВЕРХНОСТНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ В СВИНЦЕ

И. Н. Хлюстиков, В. А. Березин*

*Институт физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук
117334, Москва, Россия*

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 9 января 2002 г.

Проведены наблюдения метастабильных переохлажденных нормальных объемных состояний на образцах свинца. Показано, что такие состояния реализуются, когда критическое поле поверхностной сверхпроводимости H_{c3} меньше критического поля H_c и в обратном случае. Таким образом, поверхностная сверхпроводимость не является для объемной зародышем с параметрами выше критических.

PACS: 74.55.+h

1. ВВЕДЕНИЕ

В ходе исследований сверхпроводимости плоскости двойникования [1] было обнаружено, что окружающий плоскость двойникования объем образца может оставаться в метастабильном переохлажденном нормальном состоянии, несмотря на то что сама плоскость двойникования уже находится в сверхпроводящем. Тот же самый качественный результат был получен в работе [2], в которой плоская N – S -граница (граница между нормальной и сверхпроводящей фазами) формировалась за счет «эффекта близости» при контакте двух различных сверхпроводников. Таким образом, в этих работах для сверхпроводников первого рода показано, что зародыш сверхпроводящей фазы ни в том, ни в другом случаях не имеет параметров, приводящих к абсолютной неустойчивости термодинамически невыгодного нормального состояния.

Третья система (исторически, по-видимому, рассмотренная первой), в которой возникает плоская N – S -граница — это граница, порожденная поверхностной сверхпроводимостью. Эта задача рассматривалась, например, в хорошо известной работе [3]. В ней сделано утверждение, что в сверхпроводниках первого рода с относительно малой величиной па-

раметра Гинзбурга–Ландау, $\kappa < 0.42$, критическое магнитное поле поверхностной сверхпроводимости, $H_{c3} < H_c$, наблюдается как граница возможных метастабильных переохлажденных нормальных состояний в объеме образцов. В сверхпроводниках же первого рода с большой величиной этого параметра, $0.42 < \kappa < 1/\sqrt{2}$, в которых $H_{c3} > H_c$, существование поверхностной сверхпроводимости приводит к тому, что метастабильные переохлажденные состояния оказываются вообще запрещенными. Другими словами, делается вывод о том, что поверхностная сверхпроводимость всегда является зародышем со сверхкритическими параметрами. Авторы работы [4] полностью согласились с выводами [3].

Несколько позже, например в работах [5, 6], была сделана попытка более тщательных исследований влияния поверхностной сверхпроводимости на объемную. В них получены данные, указывающие на то, что результаты [3] следует в значительной мере пересмотреть и уточнить. Однако эти работы не были доведены до логического конца и точка зрения [3], воспроизведенная в книге [7], осталась наиболее популярной.

Целью настоящей работы являлось исследование вопроса, действительно ли поверхностная сверхпроводимость представляет собой для сверхпроводимости в объеме образцов зародыш со сверхкритическими характеристиками.

*E-mail: khly@kapitza.ras.ru

2. ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАЗЦЫ

Характерными признаками, которые свидетельствуют о существовании метастабильных состояний при фазовых переходах первого рода, являются гистерезис и скачкообразное изменение свойств исследуемых образцов. Наличие гистерезиса определяется энергетическим барьером между возможными состояниями системы, а скачок возникает из-за того, что при нарушении устойчивости метастабильных состояний система находится уже далеко от условий фазового равновесия и новая фаза возникает сразу в большом количестве или с большой амплитудой. Именно на эти характерные признаки существования метастабильных состояний — гистерезис и скачкообразное изменение свойств образцов — было обращено основное внимание настоящей работы.

В качестве материала для образцов в данной работе был выбран свинец. В свинце, из-за того что он имеет кубическую плотноупакованную кристаллическую структуру, при пластической деформации не рождаются двойники, которые, как установлено в [1], могут оказать влияние на ширину области метастабильных состояний. Кроме того, при сравнительно высоких температурах, вблизи критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние, для свинца $H_{c3} < H_c$, а при более низких — $H_{c3} > H_c$, см., например, [4]. Это позволяет на одном и том же образце в течение одного и того же гелиевого эксперимента проводить измерения критических полей как при $\kappa < 0.42$, так и при $\kappa > 0.42$.

Для проведения измерений был взят образец, исследовавшийся ранее в работе [8]. Он представлял собой монокристаллическую плоскопараллельную пластину с размерами $13 \times 6 \times 1$ мм³.

В данной работе регистрировались ВЧ-потери (потери высокочастотного сигнала) в образце, размещенном внутри спирального резонатора. Форма спирального резонатора повторяла форму образца. Длина резонатора составляла примерно треть от длины образца, для того чтобы торцевые части образца по возможности не влияли на ВЧ-отклик. Резонансная частота определялась геометрией резонатора и в наших экспериментах составляла около 450 МГц. Ось спирального резонатора лежала в горизонтальной плоскости параллельно вертикально расположенной плоскости образца. Для создания магнитного поля использовался электромагнит. Электромагнит мог вращаться в горизонтальной плоскости, что позволяло установить направление магнитного поля параллельно плоскости образца.

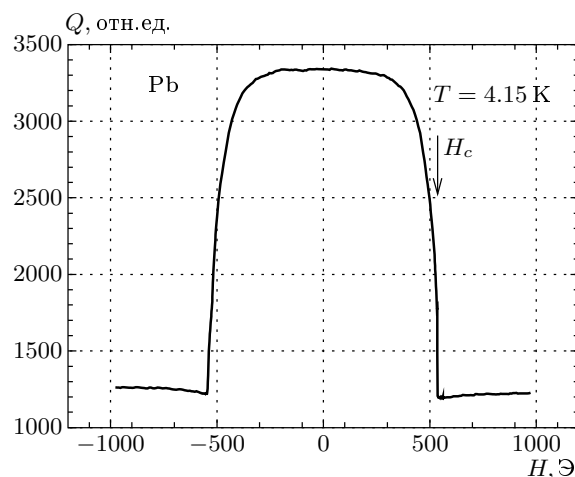


Рис. 1.

Более подробное описание использованной установки и методики измерений содержится в работе [9].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 приведен пример экспериментальной записи зависимости добротности измерительного контура (в относительных единицах) от магнитного поля при $T = 4.15$ К. Развертка поля осуществлялась в интервале от около -1 кЭ до примерно +1 кЭ. «Горизонтальные» участки представленной записи с относительно малой добротностью контура в случае, когда внешнее приложенное к образцу магнитное поле велико, соответствуют нормальному состоянию образца. Если же образец находится в сверхпроводящем состоянии, то добротность измерительного контура возрастает. Величина критического магнитного поля H_c , определенная на основании этой записи, составляет 535 Э.

На рис. 2 показан участок той же записи в малой окрестности H_c . На нем видны все характерные особенности, которые доказывают факт существования в образце метастабильных состояний. Магнитные поля, ограничивающие область гистерезиса, отмечены на рисунке стрелками и обозначены H_c и H_{sc} . Хорошо видно, что в поле H_{sc} свойства образца изменяются скачкообразно. Направление скачка на рисунке также показано стрелкой. Нижняя ветвь петли гистерезиса, на которой добротность измерительного контура соответствует нормальному состоянию образца, образуется при уменьшении внешнего магнитного поля от значений, превышающих H_c . Верхняя,

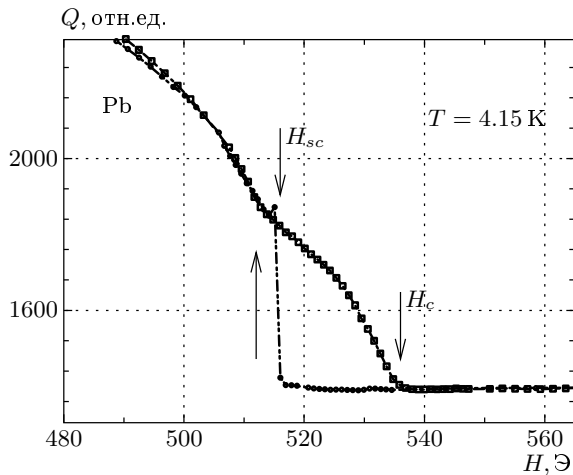


Рис. 2.

наоборот, — при увеличении внешнего магнитного поля. Скачок в поле H_{sc} наблюдается только при уменьшении поля. Следует подчеркнуть, что именно необходимость превышения приложенного внешнего магнитного поля величины H_c позволяет идентифицировать эту точку как критическое магнитное поле объемной сверхпроводимости.

Проявления существующих метастабильных, обусловленных перегревом, состояний на представленной на рис. 2 записи отсутствуют, так как из-за конечной протяженности образца они смещены от H_c в сторону меньших полей и находятся (на рис. 1) в месте отклонения добротности измерительного контура от максимального значения. Левая часть представленных на рис. 2 кривых соответствует промежуточному состоянию образца, в котором и нормальная, и сверхпроводящая фазы присутствуют одновременно. Отметим, что при использовании образцов с формой, отличной от эллипсоида, исследования явления перегрева в сверхпроводниках не имеют смысла по причине неопределенности величины размагничивающего фактора.

При более низких температурах, вплоть до 1.5 К, присутствие метастабильных переохлажденных состояний регистрируется на фоне сигнала, обусловленного поверхностной сверхпроводимостью. Пример такой экспериментальной записи представлен на рис. 3. Для наглядности в качестве иллюстрации выбрана запись, сделанная при температуре 3.1 К, на которой вклад в изменение добротности измерительного контура от поверхностной сверхпроводимости и от метастабильных состояний близки друг к другу; рассогласование кривых в точке H_c связано с дрейфами сигнала при измерениях. Поверх-

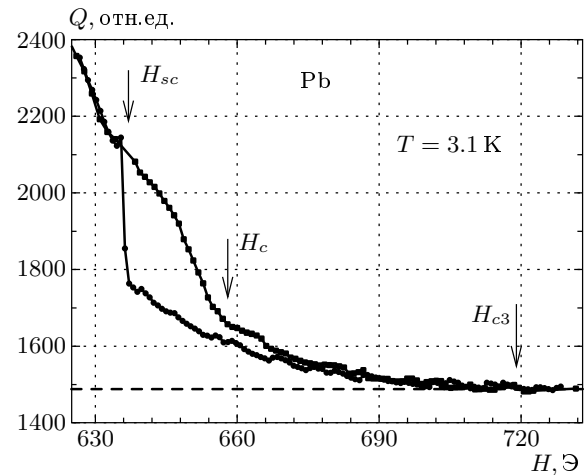


Рис. 3.

ностная сверхпроводимость приводит к тому, что добротность измерительного контура превышает соответствующий нормальному состоянию образца уровень. Этот уровень показан на рис. 3 горизонтальной штриховой линией. Характерная точка, определенная по отклонению зависимости $Q(H)$ от горизонтали, на рис. 3 указана стрелкой и обозначена H_{c3} . Такой способ определения H_{c3} дает, конечно, только оценку снизу на величину критического магнитного поля поверхностной сверхпроводимости, однако в данный момент нам существенно только то, что H_{c3} превышает и H_c , и H_{sc} . Эти критические магнитные поля также указаны на рис. 3.

4. ВЫВОДЫ

Во всех трех исследованных случаях плоской $N-S$ -границы (в работах [1, 2] и в настоящей работе) обнаружено, что всегда остается возможность существования метастабильных переохлажденных нормальных состояний в объеме образцов. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что ни сверхпроводимость плоскости двойникования, ни сверхпроводимость, индуцированная за счет эффекта близости, ни поверхностная сверхпроводимость не являются для объемной сверхпроводимости зародышем с надкритическими параметрами. Исходя из рассуждений о балансе между поверхностной и объемной энергиями при фазовых переходах первого рода следует заключить, что поверхностная энергия $N-S$ -границы растет по мере ее удаления от ис-

точника зарождения сверхпроводимости. Этот экспериментально установленный факт никак не может быть согласован с положениями теоретической модели работ [3, 7], в которых постулируется независимость поверхностной энергии от координаты места нахождения плоской границы между нормальной и сверхпроводящей фазами.

Область наблюдения метастабильных состояний оказывается уже, чем в отсутствие «посторонних» для объема образцов источников сверхпроводящей фазы, наблюдаемое критическое поле $H_{sc} > H_{c3}/1.7 = H_{c2}$. Отсюда следует, что «посторонняя» сверхпроводимость, конечно, влияет на устойчивость метастабильных переохлажденных состояний. Тем не менее результаты настоящей работы показывают, что даже собственная поверхностная сверхпроводимость не накладывает полного запрета на возможность наблюдения явления переохлаждения в сверхпроводниках первого рода. Более того, следует сделать вывод, что на фазовой диаграмме сверхпроводников должна существовать целая линия критических магнитных полей H_{sc} , лежащая ниже линии критических полей H_c , на которой нарушается устойчивость нормальных переохлажденных состояний в объеме сверхпроводников первого рода при наличии поверхностной сверхпроводимости.

Авторы благодарны В. А. Тулину, В. С. Эдельману, В. И. Марченко, Е. Р. Подоляку за многочисленные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 00-02-16250).

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Хлюстикова, ЖЭТФ **94**, 311 (1988).
2. И. Н. Хлюстикова, ЖЭТФ **112**, 1119 (1997).
3. D. Saint-James and P. G. de Gennes, Phys. Lett. **7**, 306 (1963).
4. M. Cardona and B. Rosenblum, *Low Temperature Physics*, LT9, Part A, Plenum Press, New York (1965), p. 560.
5. J. Feder, Sol. St. Commun. **5**, 299 (1967).
6. J. P. McEvoy, D. P. Jones, and J. G. Park, Sol. St. Commun. **5**, 641 (1967).
7. П. Де Жен, *Сверхпроводимость металлов и сплавов*, Мир, Москва (1968).
8. Р. Т. Мина, М. С. Хайкин, ЖЭТФ **45**, 1304 (1963).
9. В. А. Березин, В. А. Тулин, ЖЭТФ **110**, 1054 (1996).