

ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ НОРМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ПЕРВОГО РОДА В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

*В. А. Березин**, *И. Н. Хлюстикова***

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

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

Поступила в редакцию 25 июня 2008 г.

Экспериментально изучено переохлаждение нормального состояния в монокристаллических образцах свинца в области существования поверхностной сверхпроводимости. Построена зависимость поля переохлаждения на фазовой диаграмме сверхпроводника. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

PACS: 74.25.-q

1. ВВЕДЕНИЕ

В широко известной книге [1] на основании более ранних работ, например, [2], сделано утверждение, что в магнитных полях, меньших $H_{c3} = 2.3965\kappa_{GL}H_c$, переохлажденные нормальные состояния объема сверхпроводника оказываются запрещенными. Другими словами это означает, что поверхностная сверхпроводимость всегда является для объема сверхпроводника зародышем сверхкритического размера. Позже, как экспериментально [3–5], так и теоретически [6–8] было установлено, что сделанное утверждение справедливо только в том случае, когда характеризующий сверхпроводимость параметр Гинзбурга–Ландау κ_{GL} меньше 0.41. При больших значениях этого параметра возможность переохлаждения объема сверхпроводника остается.

Имеющиеся данные позволяют сделать вывод о том, что в сверхпроводниках первого рода с большими значениями параметра κ_{GL} в магнитных полях, меньших критического H_c , существует критическое поле переохлаждения H_{sc} . Однако зависимость $H_{sc}(\kappa_{GL})$ установлена только теоретически.

Экспериментальные исследования этого вопроса

удобней всего проводить на образцах свинца, поскольку в нем при изменении температуры величина $\kappa(T) = H_{c3}(T)/2.3965H_c(T)$ меняется в весьма широких пределах — от 0.25 до 0.55 [4]. Введенный таким способом параметр $\kappa(T)$ вблизи критической температуры совпадает с κ_{GL} . Кроме того, необходимо подчеркнуть, что образцы для исследований должны быть монокристаллическими из-за существенной анизотропии сверхпроводящих свойств свинца [9].

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Как и в предыдущей работе [5], в качестве образцов использовались монокристаллы свинца в виде плоскопараллельных пластин размерами $13 \times 6 \times 1$ мм³. Исходный свинец характеризовался отношением сопротивлений при комнатной и гелиевой температурах на уровне $(0.6-1) \cdot 10^4$. Ранее эти монокристаллы исследовались в экспериментах по циклотронному резонансу [10, 11]. Большая грань образцов была параллельна кристаллографической плоскости (011). Длинная ось одного из образцов соответствовала направлению [111], а другого — [100]. Такая взаимная ориентация осей при направлении внешнего магнитного поля вдоль длинной оси

*E-mail: berezin@ms2.inr.ac.ru

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

образцов отвечает максимальному и минимальному значениям κ [9].

В качестве физической величины, за которой велось наблюдение, были выбраны ВЧ-потери в образце, которые несут информацию о процессах, происходящих в поверхностном слое (толщиной порядка скин-слоя в нормальном состоянии и порядка глубины проникновения для сверхпроводящего состояния).

Измерения проводились по схеме проходного спектрометра, когда измеряется ВЧ-мощность, прошедшая через резонатор с образцом. При малых (около 10%) изменениях добротности резонатора изменение прошедшей ВЧ-мощности пропорционально потерям в образце, вызванным движением нормальных электронов. Амплитуда магнитного ВЧ-поля на поверхности образцов в проведенных экспериментах не превышала 0.05 Э.

Образец помещался в катушку резонатора таким образом, что его длинная ось совпадала с осью катушки. Катушка резонатора с целью увеличения коэффициента связи с образцом была сделана с минимальными зазорами между поверхностью образца и витками катушки. Длина катушки была несколько меньше длины образца. Это позволяло минимизировать влияние торцевых поверхностей образца на результаты измерений. Резонансная частота составляла около 500 МГц. При работе на такой частоте глубина скин-слоя в наших образцах оценивается на уровне примерно 0.1 мкм, т. е. она соизмерима с длинами, характеризующими сверхпроводимость в свинце.

Постоянное магнитное поле создавалось внешним электромагнитом, который мог вращаться в горизонтальной плоскости. Возможность поворота магнита использовалась для установки направления магнитного поля параллельно большой грани образцов. Для этого мы воспользовались следующим приемом. Фиксировалось магнитное поле величиной несколько меньшей, чем H_c , — такое, чтобы образец находился в промежуточном состоянии. В таких условиях из-за различий в размерах образцов в разных направлениях количество сверхпроводящей фазы в образце и, соответственно, добротность резонатора максимальны в случае параллельности поля и большой грани образца. Точность юстировки направления магнитного поля составила около 1° .

Измерения величины магнитного поля проводились при помощи датчика Холла, расположенного вне криостата на сердечнике электромагнита. Точность измерений поля при отклонении от выбранной

реперной точки в пределах около 50 Э составляла 0.2 Э, а абсолютная точность — примерно 2 Э.

Контроль температуры проводился при помощи термометра сопротивления и по давлению паров жидкого гелия, а также по реперной точке сверхпроводящего перехода свинца.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Характерными проявлениями метастабильного переохлажденного состояния при фазовых переходах первого рода являются скачкообразное изменение свойств при достижении границы устойчивости метастабильных состояний и гистерезис. Для повторного наблюдения метастабильных, например, переохлажденных состояний необходимо предварительно полностью подавить низкотемпературную фазу. Именно такое поведение мы наблюдали при исследованиях сверхпроводимости в свинце.

На рис. 1 показана зависимость ВЧ-потерь в образце от внешнего магнитного поля при высокой температуре, когда $\kappa < 0.41$ и поверхностная сверхпроводимость отсутствует. На горизонтальном участке кривой в больших магнитных полях образец находится в нормальном состоянии. При уменьшении величины магнитного поля нормальное состояние сохраняется до поля H_{sc} , где наблюдается скачок поглощения — в образце появляется сверхпроводящая фаза. При увеличении магнитного по-

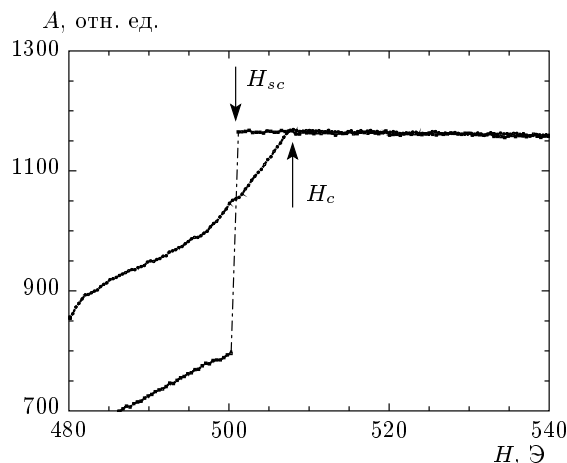


Рис. 1. Пример экспериментальной записи поглощения ВЧ-мощности образцом свинца при переходе в сверхпроводящее состояние. Поверхностная сверхпроводимость отсутствует: H_c , H_{sc} — соответственно термодинамическое критическое поле и поле переохлаждения

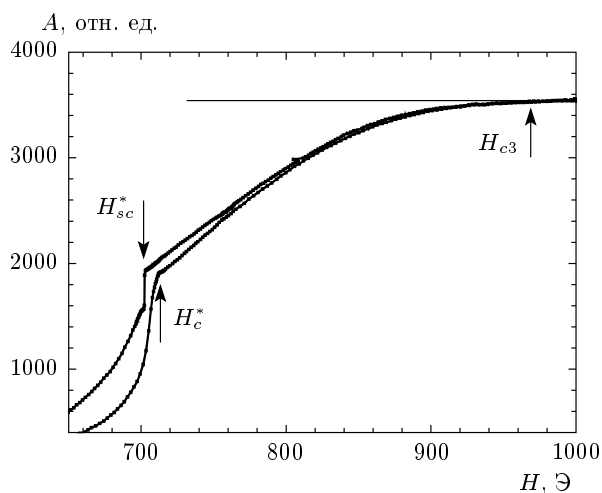


Рис. 2. Пример экспериментальной записи поглощения ВЧ-мощности образцом свинца в условиях существования поверхностной сверхпроводимости: H_{c3} — критическое поле поверхностной сверхпроводимости. Разница между кривыми в интервале полей между H_c^* и H_{c3} при увеличении и уменьшении приложенного магнитного поля обусловлена экранирующими токами по поверхностному слою

ля поглощение изменяется непрерывно, а в точке H_c регистрируется излом. Для повторного наблюдения скачка необходимо приложить внешнее поле, превышающее H_c . В противном случае в объеме образца сохраняются области существования сверхпроводящей фазы и скачок отсутствует.

Поскольку в данном случае магнитную восприимчивость образца в нормальном состоянии можно считать пренебрежимо малой, измеренные величины магнитного поля следует считать характеризующими свинец критическими полями.

На рис. 2 показан пример экспериментальной записи, сделанный в условиях существования поверхностной сверхпроводимости (при низких температурах). Поверхностная сверхпроводимость в данном случае регистрируется как отклонение (уменьшение ВЧ-поглощения) от горизонтальной зависимости, характерной для нормального состояния образца. Начало этого отклонения на рисунке обозначено H_{c3} . Это критическое поле поверхностной сверхпроводимости.

Различие между кривыми, регистрируемыми при увеличении и уменьшении внешнего магнитного поля, в области наблюдения поверхностной сверхпроводимости обусловлено незатухающими контурными токами, протекающими по поверхности образца. Экранирующие незатухающие токи

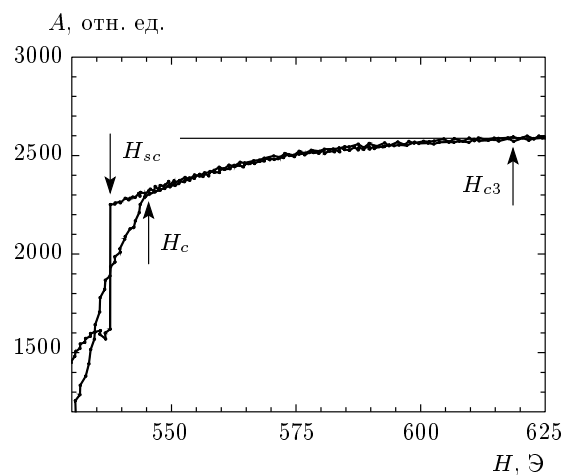


Рис. 3. Пример экспериментальной записи поглощения ВЧ-мощности образцом свинца. Поверхностные экранирующие токи подавлены

приводят к тому, что магнитное поле внутри образца отличается от измеряемого поля снаружи. Это состояние существенно неравновесное, поэтому на рис. 2 характерные точки возникновения и исчезновения сверхпроводимости в объеме образца обозначены соответственно H_c^* и H_c .

Экспериментально наблюдаемые отклонения поглощения ВЧ-мощности от уровня, характеризующего нормальное состояние, фактически являются мерой количества сверхпроводящей фазы в поверхностном слое образца. Максимальное наблюдавшееся уменьшение поглощения ВЧ-мощности, обусловленное поверхностной сверхпроводимостью, не превышало 50% от полного, когда весь образец находится в сверхпроводящем состоянии. Это говорит о том, что поверхностная сверхпроводимость занимает не всю поверхность образца, а только малую ее часть. Более того, можно утверждать, что незатухающие экранирующие изменения внешнего магнитного поля токи из-за краевых эффектов сжимают область существования поверхностной сверхпроводимости в поясок вблизи середины образца.

Форма образцов, а также тот факт, что поверхностная сверхпроводимость занимает только малую часть поверхности образца, позволили провести измерения критических полей в равновесных условиях — в условиях, когда поля внутри и вне образца равны между собой, а поверхностный ток отсутствует. При повороте образца вокруг оси, перпендикулярной большой грани образца, на малый угол порядка 5° – 10° области существования поверхностной сверхпроводимости на больших гранях не изменяют-

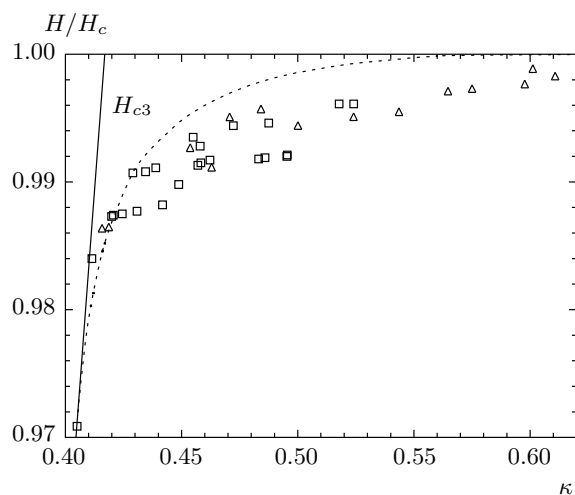


Рис. 4. Зависимость нормированного на H_c поля переохлаждения H_{sc} от параметра $\kappa(T) = H_{c3}(T)/2.3965H_c(T)$. Разные значки соответствуют двум разным образцам. Пунктиром показана теоретическая кривая из работы [8]

ся, а на малых длинных смещаются в сторону углов образца. Регистрируемые зависимости приобретают вид, показанный на рис. 3. О разрыве сверхпроводящих контуров, по которым протекали экранирующие токи, свидетельствует совпадение кривых при увеличении и уменьшении внешнего магнитного поля в интервале между H_c и H_{c3} .

Результаты измерений поля переохлаждения представлены на рис. 4. На этом же рисунке пунктиром показана теоретическая кривая из работы [8]. Полученные данные говорят о том, что действительно, в соответствии с теоретическими результатами, при больших значениях параметра κ существует энергетический барьер, препятствующий распространению сверхпроводящей фазы от поверхности на весь объем образца. Вместе с тем необходимо отметить, что наблюдается систематическое отклонение экспериментальных результатов

от количественных предсказаний теории. Зарегистрированные значения величин переохлаждения существенно больше, особенно в верхней части исследованного диапазона изменений κ . Расхождения между экспериментальными и теоретическими результатами, скорее всего, связаны с тем, что измерения проводились при температурах далеких от критической, далеко от области применимости теории Гинзбурга–Ландау.

Авторы благодарны В. С. Эдельману, В. А. Тулину, В. И. Марченко, Е. Р. Подоляку за многочисленные полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-16958а).

ЛИТЕРАТУРА

1. П. де Жен, *Сверхпроводимость металлов и сплавов*, Мир, Москва (1968).
2. D. Saint-James and P. G. de Gennes, *Phys. Lett.* **7**, 306 (1963).
3. J. P. McEvoy, D. P. Jones, and J. G. Park, *Sol. St. Comm.* **5**, 641 (1967).
4. F. W. Smith and M. Cardona, *Sol. St. Comm.* **6**, 37 (1968).
5. И. Н. Хлюстикова, В. А. Березин, *ЖЭТФ* **121**, 1370 (2002).
6. J. Feder, *Sol. St. Comm.* **5**, 299 (1967).
7. J. G. Park, *Sol. St. Comm.* **5**, 645 (1967).
8. В. И. Марченко, Е. Р. Подоляк, *ЖЭТФ* **124**, 172 (2003).
9. И. Я. Краснополин, Радж Руп, М. С. Хайкин, *Письма в ЖЭТФ* **15**, 516 (1972).
10. М. С. Хайкин, Р. Т. Мина, *ЖЭТФ* **42**, 35 (1962).
11. Р. Т. Мина, М. С. Хайкин, *ЖЭТФ* **45**, 1304 (1963).