

Метастабильная сверхпроводимость межфазной области раздела Al и Al₂O₃

Н. С. Сидоров, А. В. Пальниченко¹⁾, С. С. Хасанов

Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 31 мая 2011 г.

Измерениями динамической магнитной восприимчивости обнаружена сверхпроводимость в межфазной области раздела между металлическим алюминием и его оксидом Al₂O₃ при температуре ≈ 45 К.

Недавно было обнаружено, что у ряда металлов, покрытых слоем их оксидов, а именно у Na [1], Cu [2] и Fe [3], после специальной термообработки возникает метастабильная поверхностная сверхпроводимость со сравнительно высокими температурами перехода в сверхпроводящее состояние T_c .

В настоящей работе описаны эксперименты, в которых аналогичное явление наблюдалось на Al.

Образец Al чистотой 99.99%, приближенный к шарообразной форме диаметром $r \approx 3$ мм, помещали на сапфировую подложку и окисляли с поверхности в атмосфере кислорода при температуре выше его температуры плавления в течение 1–2 мин. В результате образец принимал форму слегка сплюснутого шарика, покрытого слоем оксидной пленки.

Затем образец анализировали методом рентгеновской дифракции. На рис. 1 показана рентгеновская

дифракционная картина. Дифракционные пятна соответствуют монокристаллическому Al ($a = 4.049$ Å, Fm3m) [4], а дифракционные кольца — поликристаллической пленке оксида алюминия Al₂O₃ ($a = 4.758$ Å, $c = 12.99$ Å, R-3c) [4], сформированной на его поверхности.

После этого проводились измерения температурных зависимостей действительной (χ') и мнимой (χ'') частей динамической магнитной восприимчивости образца. Образец помещали внутрь одной из двух одинаковых катушек индуктивности. Катушки помещали во внешнее переменное магнитное поле с заданными частотой ν и амплитудой H_{ac} , лежащими в диапазонах 31–3100 Гц и 0.025–1 Э, и подключали к дифференциальному входу нановольтметра, работающего в режиме синхронного детектирования.

Кривые 1 на рис. 2 демонстрируют результаты измерений $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$ образца Al на частоте 310 Гц, $H_{ac} = 0.025$ Э, которые не зависели от выбора H_{ac} в указанном выше измерительном диапазоне и от внешнего постоянного магнитного поля H_{dc} в исследованном интервале 0–50 Э.

При комнатной температуре скин-глубина δ переменного магнитного поля в образце Al на частоте 310 Гц составляет ≈ 4.8 мм и значительно превышает радиус образца ($r \approx 1.5$ мм). При понижении температуры электропроводность образца монотонно увеличивается, что приводит к уменьшению скин-глубины δ , увеличению выталкивания переменного магнитного поля из образца и, таким образом, к монотонному уменьшению χ' .

По мере достижения низких температур зависимость электропроводности образца от температуры ослабевает, что приводит к выходу зависимости $\chi'(T)$ на постоянную величину, кривая 1 на рис. 2а.

Зависимость $\chi''(T)$ характеризует диссипацию энергии переменного магнитного поля в образце, которая в немагнитном материале определяется его электропроводностью и глубиной проникновения переменного магнитного поля в образец δ . Диссипация

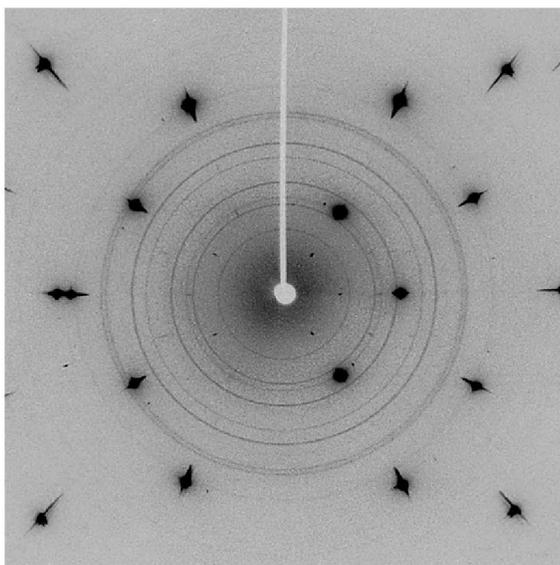


Рис. 1. Дифракционная картина, полученная для исследуемого образца; Mo-K α -излучение

¹⁾ e-mail: paln@issp.ac.ru

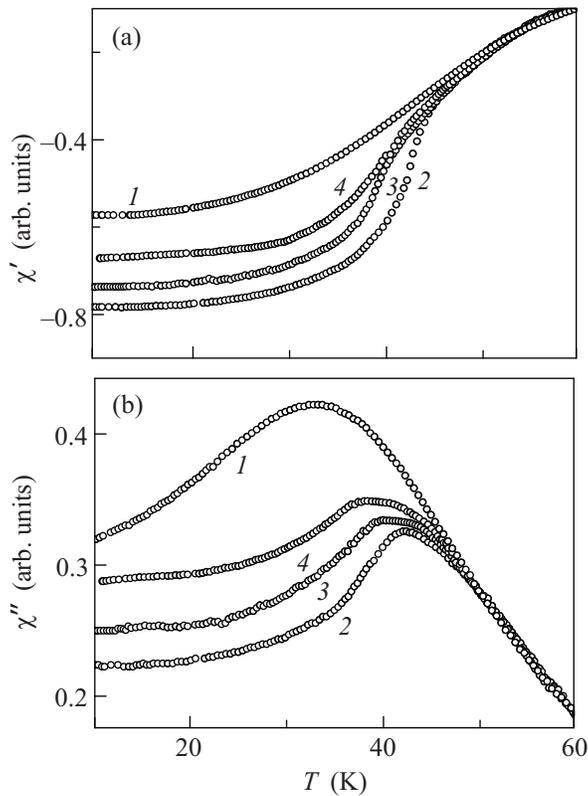


Рис. 2. Температурные зависимости действительной (a) и мнимой (b) частей динамической магнитной восприимчивости исследованного образца. Кривые 1 – окисленный с поверхности образец алюминия перед отжигом ($H_{dc} = 0$ Э, $H_{ac} = 0.025$ Э, $\nu = 310$ Гц). Кривые 2, 3 и 4 – образец после отжига при $H_{dc} = 0$, 24 и 48 Э соответственно ($H_{ac} = 0.025$ Э, $\nu = 310$ Гц)

энергии мала при $\delta \ll r$ (высокопроводящий металл) и $\delta \gg r$ (изолятор). В промежуточной области между этими пределами имеется максимум в $\chi''(T)$ при $\delta \sim r$ [5]. Изменение температуры образца приводит к изменению значения δ и прохождению его через эту область. Именно такой максимум виден на кривой 1, рис. 2b при $T \approx 33$ К.

После этих измерений образец помещали в кварцевую ампулу (внешний диаметр 6 мм, толщина стенки 1.5 мм), заполненную порошком Al₂O₃ для предотвращения взаимодействия образца со стенкой ампулы в ходе его дальнейшей термообработки. Ампулу вакуумировали до остаточного давления 10–30 Па, помещали в печь, предварительно нагретую до температуры 1020–1070 К, и отжигали в течение 1–2 мин. После этого ампулу с образцом извлекали из печи и по возможности быстро помещали в жидкий азот в связи с термической нестабильностью отожженных образцов при комнатной температуре.

В дальнейшем измерения $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$ проводились без извлечения образца из кварцевой ампулы. При этом монтаж образца на измерительную вставку, помещаемую затем в предварительно охлажденный измерительный криостат, проводился без отогрева образца.

Кривые 2 на рис. 2a и b демонстрируют $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$ образца после его отжига. Из обеих кривых видно, что скин-глубина δ образца существенно уменьшается при охлаждении образца ниже 35–45 К. Это означает, что вблизи поверхности появляется слой, проводимость которого существенно больше, чем у чистого Al. Данное явление мы объясняем возникновением сверхпроводимости в образце при $T \approx 45$ К.

Для проверки этого предположения измерения были проведены в постоянном магнитном поле H_{dc} , направленном вдоль оси катушек. Как видно из кривых 3, 4 на обоих рисунках, увеличение постоянного магнитного поля подавляет обнаруженный эффект. При этом кривые 3, 4 приближаются к кривой 1, полученной перед отжигом образца. Подобный эффект подавления диамагнетизма образца наблюдался также при увеличении амплитуды переменного магнитного поля H_{ac} без внешнего постоянного магнитного поля H_{dc} .

На рис. 3 показаны зависимости $\chi'(T)$ для разных частот переменного магнитного поля. На низкой час-

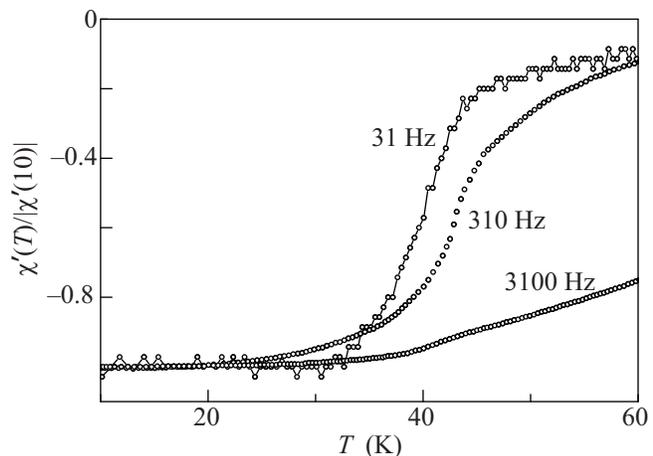


Рис. 3. Зависимости $\chi'(T)/|\chi'(10)|$ для образца после отжига, полученные при частотах переменного магнитного поля $\nu = 31$, 310 и 3100 Гц ($H_{ac} = 0.025$ Э, $H_{dc} = 0$ Э)

тоте 31 Гц нормальные токи не экранируют внутреннюю часть образца, поэтому переход в сверхпроводящее состояние отчетливо прослеживается в виде ступеньки. На частоте 3100 Гц эта ступенька маскируется эффектом экранирования нормальными токами.

Существенная разница свойств образца до и после его отжига, наблюдаемая в измерениях $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$, не заметна в дифрактометрических измерениях, то есть новой фазы после отжига образца не образуется. Поэтому все изменения свойств образца мы вынуждены приписать межфазной области в слое, разделяющем фазы Al и Al_2O_3 .

Следует подчеркнуть, что такие свойства межфазной области являются термически неустойчивыми. Неустойчивость проявляется в исчезновении сверхпроводимости в образце после выдержки ампулы с образцом при комнатной температуре в течение ~ 20 ч. При этом $\chi'(T)$ и $\chi''(T)$ такого образца снова воспроизводят кривые 1, рис. 2.

В заключение отметим, что сверхпроводимость в межфазной области, разделяющей Al и Al_2O_3 , наблюдается при температуре $T_c \approx 45$ К, существенно превышающей $T_c \approx 1.2$ К для Al. Данное явление обнаружено нами и в других подобных объектах на основе металлов различных групп (Na/ NaO_x , Cu/ CuO_x , Fe/ FeO_x). Эти факты говорят об общности наблюдаемого явления и позволяют сделать вывод о том, что у многих (если не у всех) металлов при соответствующих условиях окисления и термообработки мож-

но сформировать в межфазной области металл/оксид металла двумерный сверхпроводящий слой с довольно высокими температурами перехода в сверхпроводящее состояние.

Авторы глубоко благодарны В.В.Рязанову и В.Ф.Гантмахеру за конструктивные обсуждения результатов работы. Работа выполнена в рамках проектов Президиума РАН “Физика конденсированных сред” и “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества”.

-
1. N. S. Sidorov, A. V. Palnichenko, and S. S. Khasanov, *Solid State Commun.* **150**, 1483 (2010).
 2. N. S. Sidorov, A. V. Palnichenko, and S. S. Khasanov, *Phys. C.* **471**, 247 (2011).
 3. N. S. Sidorov, A. V. Palnichenko, and I. I. Zver'kova, *Phys. C.* **471**, 406 (2011).
 4. The International Centre for Diffraction Data (ICPDS), http://www.icdd.com/products/2008Sales_Catalog.pdf, (2008).
 5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, М.: Наука, 1982, с. 286.