

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P3-92-186

**Д.А.Корнеев, Л.П.Черненко, А.В.Петренко,
Н.И.Балалыкин, А.В.Скрыпник**

**АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДИАМАГНИТНОГО
ПРОФИЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НИОБИЯ
У ГРАНИЦЫ С ВАКУУМОМ**

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

Как представлено в пионерской работе [1], зеркальное отражение тепловых поляризованных нейтронов может служить прямым методом измерения абсолютного значения глубины проникновения Λ магнитного поля в сверхпроводник. Однако, как было отмечено в той же работе, ситуация после первых измерений на ниобии выглядит не совсем идеально. Другой, чувствительный метод определения Λ , основанный на измерении прямого тока в джозефсоновских туннельных переходах в слабом магнитном поле [2], дал в пленках ниобия значение $\Lambda = 90$ нм (приведенное к нулевой температуре), что существенно больше полученного в работе [1] $\Lambda = 41$ нм. Причины противоречия устраняются в нашей работе, предпринятой с целью уточнения картины проникновения постоянного магнитного поля в ниобиевый сверхпроводник в мейснеровской фазе.

Мы провели эксперименты на двух ниобиевых пленках с различной толщиной и шероховатостью, приготовленных по одной и той же методике напыления. Эксперименты выполнялись на спектрометре поляризованных нейтронов на высокопоточном реакторе ИБР-2 в Дубне в режиме нейтронного рефлектометра [3]. Последовательно проводилось два измерения. При комнатной температуре измерялись спектры зеркально отраженных нейтронов и из них извлекались нейтронно-оптические параметры (в том числе толщина и шероховатость) пленки. Затем измерения повторялись при температуре 4.9 К в магнитном поле 500 эрстед, параллельном плоскости пленки. Всей процедуре предшествовала настройка рефлектометра на угол скольжения $\theta = 0.004$ рад при $\frac{\delta\theta}{\theta} = 0.025$. Для обработки экспериментальных результатов мы использовали новый разработанный нами метод расчета коэффициентов отражения, описанный в работе [4] и основанный на замене непрерывного одномерного нейтронно-оптического потенциала пленки на дискретный ряд квазипотенциалов Ферми, с целью моделирования отражения плоских волн от одномерно неоднородных сред. В отличие от традиционного подхода [1] в этом подходе шероховатость учитывается на стадии вычисления коэффициента отражения введением нарастающих амплитуд ферми-потенциалов по закону гауссовой функции ошибок с дисперсией, равной квадрату параметра глубины шероховатости (σ). Эквивалентность получаемых результатов при учете

шероховатости этих двух методов для чисто ядерных потенциалов проанализирована нами отдельно и имеет одинаковые границы применимости. Неэквивалентность для случая интерференции ядерного и магнитного отражения этих подходов при учете шероховатости обсуждалась нами в работе [4]. В частности, нами было отмечено, что неправильный учет шероховатости может существенно занижать извлекаемое из данных эксперимента значение Λ .

Особенности косоугольного напыления привели к тому, что использованная нами в измерениях "тонкая" пленка площадью $28 \times 50 \text{ мм}^2$, нанесенная на кремниевую подложку, имела плавно меняющуюся толщину. Извлеченные из нейтронных измерений средняя по площади толщина равна 265 нм, неравномерность в пределах $\pm 15 \text{ нм}$ и $\sigma < 0.5 \text{ нм}$. "Толстая" пленка на ситаловой подложке, полученная наклонным пылением с целью увеличения шероховатости, имела $\sigma = 8 \text{ нм}$, и ее толщина, определенная методом Резерфордского обратного рассеяния ионов гелия, равна 700 нм. Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние обеих пленок равна 8.95 К. Исследования состава исходного материала для напыления ниобия, а также самих пленок, методом нейтрон-активационного анализа обнаружили, кроме 0.3% тантала, других примесей в пленках менее 10^{-5} . Дополнительные сведения о составе пленок получены методом обратного резонансного рассеяния ионов гелия на кислороде. Примесей кислорода не наблюдалось на уровне 3% чувствительности. Пленки, получаемые нами данным методом напыления, как правило, обладают сверхпроводящими свойствами при толщинах начиная с 40 нм, при гелиевой температуре.

На первом этапе при моделировании эксперимента использовалось представление о профиле диамагнитного отклика пленки, следующее из локальной лондонской электродинамики сверхпроводников. На рисунке 1 приводится R-отношение коэффициентов отражения нейтронов с противоположной поляризацией в зависимости от нормальной к плоскости пленки компоненты длины волны нейтрона λ . Непрерывные кривые с номером 1 получены при подгонке экспериментальных данных лондонской моделью с $\Lambda = 95 \text{ нм}$ для "тонкой" пленки и $\Lambda = 90 \text{ нм}$ - для "толстой", что соответствует наилучшему описанию экспериментальных кривых в рамках этой

модели. Результаты обработки экспериментальных данных в рамках этой модели были опубликованы нами ранее в работе [5]. (Приведенное нами в работе [5] значение $\Lambda = 145$ нм для "тонкой" пленки оказалось завышенным из-за технической ошибки в расчете.) Пунктирные кривые на рис. 1 соответствуют расчету при $\Lambda = 43$ нм, полученному в работе [1].

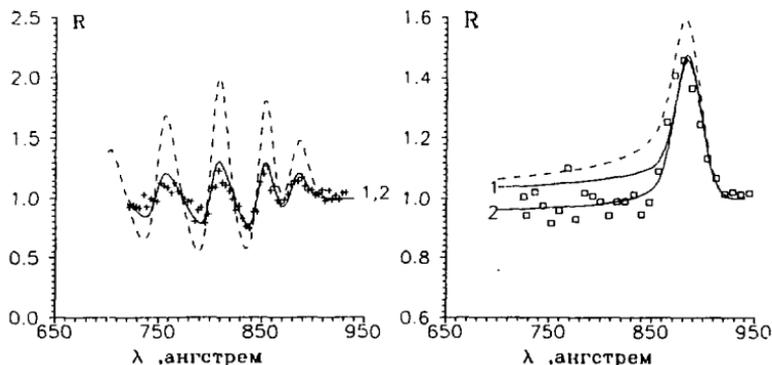


Рисунок 1. Экспериментальное R отношение коэффициентов отражения нейтронов с противоположной поляризацией в зависимости от нормальной к плоскости пленки компоненты длины волны нейтрона λ : крестиками - для "тонкой" пленки, квадратиками - для "толстой" пленки. Пунктирные кривые - расчет для лондоновской модели при $\Lambda = 43$ нм. Непрерывные кривые 1 - расчет для лондоновской модели при наилучшей подгонке при $\Lambda = 95$ нм для "тонкой" пленки и $\Lambda = 90$ нм - для "толстой". Непрерывные кривые 2 соответствуют модели с включением "мертвого" слоя у границ пленки, что привело к согласованному по обоим пленкам решению с $\xi = 28$ нм и $\Lambda = 45$ нм.

Анализ данных в рамках лондоновской модели мог бы, на первый взгляд, подтвердить результат по оценке Λ , полученный в

работе [2]. Однако ситуация на самом деле требует более пристального внимания. Следует заметить, что экспериментальные значения спектральной R-функции для "толстой" пленки при длинах волн λ менее 850 ангстрем систематически лежат ниже расчетной кривой 1, указывая на то, что в среднем $R < 1$ в данном интервале. В работе [1] аналогичное свойство R-функции так же проявилось на краю спектрального интервала в одной экспериментальной точке, но не было отмечено авторами. В более поздней работе [6] при исследованиях на сверхпроводнике $Pb_{0.992}Bi_{0.008}$ аналогичное свойство R-функции было зарегистрировано более надежно. Таким образом, обсуждаемое поведение R-функции носит более общий характер и свойственно не только ниобиевому сверхпроводнику. Анализ, проведенный нами ниже, показал, что это поведение отражает необычное состояние диамагнитного профиля пленки, отличное от предсказываемого лондоновской электродинамикой. В литературе периодически отмечались аномалии в экспериментах по измерению прямых туннельных токов в джозефсоновских переходах, подобных аномалии для ванадия [2], и эти аномалии относили за счет проявления эффекта подавления параметра порядка у поверхности ниобия [7]. Рассмотрим данную гипотезу более внимательно применительно к нашим результатам. Предположим, что на реальной границе ниобия с вакуумом возможно подавление параметра порядка, приводящее к появлению эффективного "мертвого" слоя на глубину ξ у поверхности на обеих границах. Причина такого поведения сверхпроводника может носить фундаментальный характер, отражающий свойство реальной поверхности. Данная гипотеза не укладывается в феноменологическую картину как электродинамики Лондонов, так и теории Гинзбурга-Ландау. Видимо, она требует разработки микроскопической модели, объясняющей явление проникновения поля через реальную границу с вакуумом. Известный пиппардовский вариант электродинамики, как отмечено в работе [1], обеспечивает поправки на глубину проникновения порядка 20%, и, таким образом, не может улучшить описание экспериментальных результатов. До настоящего времени более обоснованным было включение в рассмотрение "мертвого" слоя у подложки обусловленного эффектом близости либо другими физико-химическими

причинами, как это делалось в [7]. Введение "мертвого" слоя на границе с вакуумом для интерпретации данных на "толстой" пленке является решающим, так как состояние границы пленки с подложкой в этом случае практически не влияет на R-функцию из-за большой толщины пленки, а также отсутствия контраста нейтронно-оптического потенциала пленки и подложки. Для нас на данном этапе вполне приемлема грубая схема, качественно отражающая явление подавления параметра порядка у обеих границ пленки. Мы принимаем описание диамагнитного профиля следующего вида: поле проникает у границ пленки на глубину ξ полностью и внутри пленки на остальном участке ведет себя по лондоновскому закону с соответствующим параметром глубины проникновения. После расчета спектральных кривых эффекта для обеих пленок мы нашли согласованные параметры $\xi = 28(+/- 5)$ нм и $\Lambda = 45(+/- 15)$ нм, при этом значительно улучшив качество подгонки теоретической кривой R для "толстой" пленки (см. кривую 2 на рисунке 1) в области $R < 1$. Оценка χ^2 вместо 7.5 для кривой 1 уменьшилась до 1.4 для кривой 2, что является основанием для выбора модели с "мертвым" слоем ξ . Экспериментальная спектральная R-функция для "тонкой" пленки имеет характерную осциллирующую форму, обсуждавшуюся в работе [4]. Для "тонкой" пленки введение параметра ξ отражается на амплитуде осцилляций, требуя при увеличении ξ вводить компенсирующее уменьшение Λ . Непротиворечивое описание данных по двум пленкам с существенно отличающимися шероховатостями поверхности позволяет остановиться на последней модификации модели Лондонов увереннее. Мы не можем на данном этапе утверждать, что параметр ξ , введенный нами, как-либо связан с корреляционной длиной Гинзбурга-Ландау, тем не менее свойства использованных нами пленок в значительной степени исключают возможность трактовки ξ как имеющей химическую природу (окисел на поверхности), так и маскировку данного размера шероховатостью. Полученное нами значение $\xi = 28$ нм заметно больше параметра шероховатости как "толстой" пленки ($\sigma = 8$ нм), так и, тем более, "тонкой" пленки ($\sigma < 0.5$ нм). Подгонка экспериментальных данных в работе [1], проведенная в рамках лондоновской модели, привела к заниженному значению $\Lambda = 43$ нм из-за непра-

вильного, на наш взгляд, учета шероховатости, а отмеченная нами особенность R-функции в этой работе не обсуждается. Совпадение полученной в работе [1] величины Λ с оценками лондоновской глубины проникновения, полученными радиочастотным методом (см. ссылки в работе [1]), носит оттенок случайности.

Таким образом, наши экспериментальные данные прямо подтверждают нарастание параметра порядка не только у границы сверхпроводника с подложкой, как это косвенно проявлялось в аномалиях, отмеченных в [2,7], но и у границы с вакуумом.

Обнаруженный эффект может быть детальнее изучен в эксперименте, аналогичном проведенному нами, но при измерении зависимости эффекта от величины внешнего магнитного поля, что предполагается сделать на следующем этапе изучения обнаруженного эффекта.

В заключение отметим, что наши эксперименты по измерению глубины проникновения магнитного поля методом отражения поляризованных нейтронов позволили обнаружить аномальное поведение диамагнитного профиля сверхпроводника, которое можно связать с подавлением параметра порядка на границе сверхпроводника с вакуумом. В интерпретации экспериментальных данных аномалия не имеет альтернативного объяснения и является прямым обнаружением эффекта.

Авторы благодарны В.М.Назарову за проведение нейтрон-активационного анализа пленок и А.П.Кобзеву и Д.М.Широкову за анализ пленок методом обратного рассеяния ионов гелия, Э.-Н.-Э.Изнага за участие в начальной стадии эксперимента, а также В.Л.Аксенову за поддержку и интерес к работе.

Литература

- [1] Felcher G.P., Kampwirth R.T., Gray K.E. and Felici R. Phys.Rev.Lett., **52**, 1539 (1984).
- [2] Cucolo A.M., Pace S., Vaglio R., Di Chiara A., Peluso G., Russo M., J.Low Temp. Phys., **50**, 301 (1983).
- [3] Pasyuk V.V., Korneev D.A., Petrenko A.V., Dokukin E.B. Preprint JINR E3-91-276.

- [4] Корнеев Д.А., Черненко Л.П.
Поверхность. физика, химия, механика., **9**, 61 (1990).
- [5] Chernenko L.P., Korneev D.A., Petrenko A.V., Balalykin N.I.,
Skripnik A.V., Preprint JINR, E3-91-330, (1991) and Proc. of
the IInd Intern. Conf. on Surface X-ray and Neutron
Scattering, Bad Honnef, Germany, June 25-28, 1991.
- [6] Gray K.E., Felcher G.P., Kampwirth R.T., Hilleke R.
Phys. Rev., **B42**, 3971 (1990).
- [7] Schwidtal K. J. Appl. Phys., **43**, 202 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
23 апреля 1992 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

**Аномальное поведение диамагнитного профиля
сверхпроводящего ниобия у границы с вакуумом**

Методом зеркального отражения тепловых поляризованных нейтронов измерен профиль проникающего в сверхпроводящие ниобиевые пленки постоянного магнитного поля. При температуре 4.9 К поле 500 эрстед в пределах $\xi = 28$ нм в сверхпроводнике у границы с вакуумом проникает практически без затухания, что связано с приповерхностным подавлением параметра порядка сверхпроводника. Далее в глубине пленки затухание соответствует лондоновскому закону с постоянной $\Lambda = 45$ нм. Измерения выполнены на спектрометре поляризованных нейтронов СПН импульсного реактора ИБР-2 ОИЯИ в Дубне.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов**Anomalous Behaviour of the Diamagnetic Profile
Near the Superconducting Niobium Boundary with Vacuum**

The profile of the stationary magnetic field penetrating into the superconducting niobium films was measured by specular reflection of thermal polarized neutrons. At 4.9 K and at 500 Oe the field penetrates practically without attenuation on depth of $\xi = 28$ nm near the vacuum boundary, that is connected with the nearsurface depression of the superconducting order parameter. Further, in the depth of the film the attenuation corresponds to London's law with the decay constant $\Lambda = 45$ nm. The measurements are done on the polarized neutron spectrometer SPN at the pulsed reactor IBR-2 in Dubna.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992

22 коп.

Редактор Е.Б.Соболева. Макет Н.А.Киселевой.

Подписано в печать 18.05.92.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,75.

Тираж 355. Заказ 45327.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Дубна Московской области.