

- [1] Vidal C.R., Cooper J. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 3370–3374.  
 [2] Vidal C.R., Haller F.B. // Rev. Sci. Instr. 1971. Vol. 42. N 12. P. 1779–1784.  
 [3] Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. М., 1979. 270 с.  
 [4] Ederer D.L., Lucatorto T., Madden R.P. // Phys. Rev. Lett. 1970. Vol. 25. P. 1537–1548.  
 [5] Hessel M.M. // Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 26. P. 215–218.  
 [6] Sorokin P.P., Lankard J.R. // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 54. P. 2184–2188.

Институт общей физики  
Москва

Поступило в Редакцию  
27 мая 1992 г.  
В окончательной редакции  
12 января 1993 г.

05;12  
© 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 8, 1993

## МОСТ ВЗАИМОИНДУКТИВНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМАГНИТНОГО ОТКЛИКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*А.М.Гришин, В.Ф.Дроботько, В.Д.Стасовский, В.А.Хохлов*

Для регистрации перехода в сверхпроводящее состояние и измерения критических параметров высокотемпературных металлоксидных сверхпроводников широко используется простой четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления. Однако этот метод имеет ряд существенных недостатков, которые наиболее ярко проявляются при измерении тонких ВТСП пленок. Наличие в образце отдельного сверхпроводящего канала может создать ложное представление об объемной сверхпроводимости пленки [1–3]. Рассчитываемое (на поперечное сечение пленки) значение плотности критического тока оказывается при этом заниженным. Ненадежность этих измерений усугубляется еще и плохим качеством контактов между металлом и оксидным сверхпроводником. Нанесение хороших контактов для ВТСП керамики представляет самостоятельную серьезную технологическую проблему. Поэтому представляется актуальным использование бесконтактных способов измерения магнитной восприимчивости ВТСП материалов. Прежние методы, разработанные применительно к обычным сверхпроводникам, основаны на измерениях взаимной индуктивности [4,5] и резонансной частоты радиочастотного контура [6]. Непосредственное использование этих методов для исследования ВТСП пленок осложняется трудностью обеспечения хорошей индуктивной связи с пленкой. Эта связь определяется коэффициентом заполнения измерительного контура ВТСП пленкой микроволновой толщины. Для обычно используемых цилиндрических катушек этот коэффициент не превышает  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ . Увеличить индуктивную связь с пленкой можно с помощью катушек малой индуктивности. Этот прием используется в резонансных методах, где измеряемый сдвиг частоты резонансного контура прямо пропорционален произведению частоты на коэффициент заполнения сверхпроводящим образцом катушки контура [6]. Однако в этом случае с ростом резонансной частоты возрастает вклад

распределенных параметров кабеля в параметры резонансного контура. На частотах ниже  $\sim 100$  кГц за счет активного сопротивления кабеля уменьшается и без того невысокая добротность контура. На высоких частотах (более  $\sim 10$  МГц) уменьшение индуктивности меньше некоторой критической величины, зависящей от параметров кабеля и контура, приводит к тому, что собственная частота такого контура будет соответствовать резонансу четвертьволновой короткозамкнутой линии. Кроме того, повышение чувствительности за счет увеличения рабочей частоты приводит к квадратичному с частотой росту джоулевых потерь, обусловленных нормальными электронами, что для ВТСП пленок существенно усложняет анализ эксперимента.

Для создания эффективной индуктивной связи с образцом можно использовать плоскую измерительную катушку, расположенную вблизи поверхности сверхпроводящей пленки. В этой геометрии между катушкой и пленкой возникает дополнительная "паразитная" емкостная связь, которая на высоких частотах существенно ограничивает возможности резонансного метода. На наш взгляд, измерение магнитной восприимчивости ВТСП пленок следует проводить на низких частотах с помощью моста взаимной индуктивности.

Предложенный впервые Хартшорном [7] мост взаимной индуктивности представлял собой трансформатор, в котором вторичная обмотка разделена на две идентичные катушки, намотанные навстречу друг другу и соединенные последовательно. В идеальном случае взаимная индуктивность связанных катушек в отсутствие образца равна нулю. Если же в одну из вторичных катушек поместить образец, то величина сигнала разбаланса моста будет пропорциональна магнитной восприимчивости образца. Для балансировки моста Хартшорн использовал переменную взаимную индуктивность, которая включалась последовательно с измерительными катушками. Резистивный баланс осуществлялся с помощью переменного сопротивления, соединяющего первичную и вторичную цепи. Недостаток моста Хартшорна заключается именно в использовании прецизионной дорогостоящей переменной взаимной индуктивности и наличии связи по постоянному току между первичной и вторичными обмотками трансформатора.

В последующих модификациях моста Хартшорна этот недостаток устранялся либо путем электронного моделирования переменной взаимной индуктивности с помощью операционного усилителя и постоянной индуктивности [8,9], либо использованием автоматической балансировки моста с помощью цифровой петли обратной связи [10]. Преимущество последнего метода перед полностью аналоговой схемой обратной связи состоит в полной фильтрации шума в сигналах разбаланса моста и компенсирующего тока в результате цифровой обработки этих сигналов.

Для регистрации низкотемпературной сверхпроводимости использовались простые мостовые схемы, в которых основными узлами являются измерительная и эталонная взаимная индуктивности, синхронный детектор, многооборотный потенциометр и декадный магазин емкостей [4,5]. Балансировку моста можно упростить, если изготовить его строго симметричным с двумя идентичными низкотемпературными взаимными индуктивностями — измерительной и эталонной. Поместив в последнюю эталонный сверхпроводящий образец, можно исключить из схемы магазин емкостей и использовать для баланса моста только многооборотное сопротивление [5].

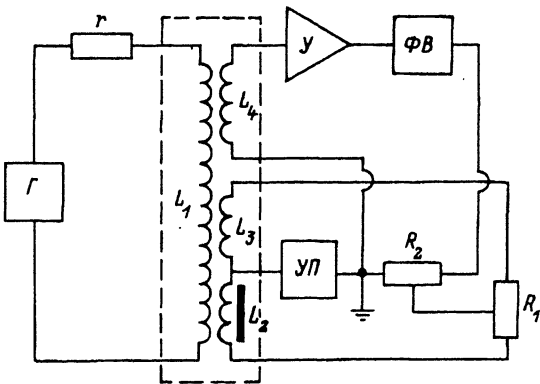


Рис. 1. Схема моста взаимной индуктивности для измерения магнитной восприимчивости ВТСП пленок на переменном токе.  
 Г — генератор,  
 У — усилитель,  
 ФВ — фазовращатель,  
 УП — усилитель-преобразователь типа УПИ-2.

Все рассмотренные выше мостовые схемы взаимной индуктивности обладают общим недостатком — сильным температурным разбалансом моста при измерениях в широком интервале температур. При исследовании ВТСП пленок именно из температурных измерений можно получить массу дополнительной информации о таких параметрах образца, как плотность критического тока и его температурная зависимость, потенциал пиннинга магнитных вихрей, степень однородности пленки и степень экранирования внешнего магнитного поля, спектр высших гармоник магнитной восприимчивости и критические поля. В данной работе мы предлагаем довольно простую в изготовлении схему модифицированного моста Хартшорна, которая позволяет получить высокую чувствительность в широком интервале температур 4.2–120 К при использовании сверхслабых возбуждающих полей 0.1–5 мЭ и рабочих частот 0.1–25 кГц.

Принципиальная схема моста показана на рис. 1. Пунктиром обведена низкотемпературная часть моста. Она содержит возбуждающую катушку  $L_1$ , приемную и компенсационную катушки  $L_1$  и  $L_3$  и катушку фазовой компенсации  $L_4$ . Пара скомпенсированных по количеству витков и площадям  $N_2 S_2 = N_3 S_3$  катушек  $L_2$  и  $L_3$ , соединенных последовательно друг с другом, вместе с многооборотным сопротивлением  $R_1$  образует плечи моста. Сопротивлением  $R_1$  осуществляется резистивный баланс моста. Для фазового баланса в диагональ моста через сопротивление  $R_2$  включается сигнал с катушки  $L_4$ , амплитуда которого усиливается до величины сигнала раскомпенсации, а фаза сдвигается фазовращателем так, чтобы суммарный сигнал был минимален. Этот сигнал поступает на вход малошумящего усилителя-преобразователя типа УПИ-2, содержащего два сдвинутых по фазе опорного сигнала на  $\pi/2$  синхронных детектора, с помощью которых выделяются синфазный и квадратурный сигналы отклика ВТСП пленки при переходе ее в сверхпроводящее состояние.

Особенностью нашего моста является оригинальная конструкция его низкотемпературной части. Схематично она показана на рис. 2. С помощью этой конструкции были решены проблемы эффективной индуктивной связи приемной катушки с ВТСП пленкой, термостабильности моста в широком интервале измеряемых температур и устранения краевых эффектов.

Для увеличения индуктивной связи в ВТСП пленкой мы использовали плоскую измерительную катушку 2, к поверхности которой заглушкой 7 поджимается измеряемая пленка 6. Аналогично измерительной катушке

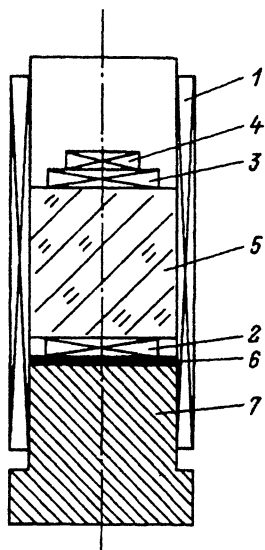


Рис. 2. Конструкция низкотемпературной части моста.

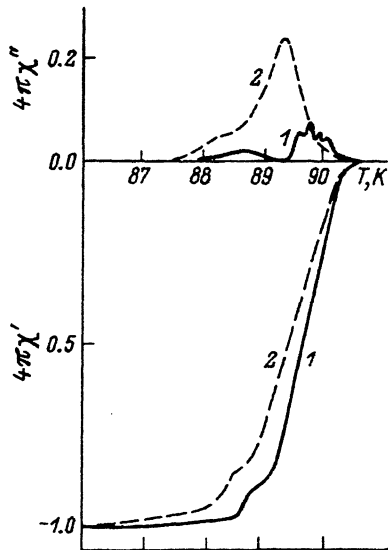


Рис. 3. Температурные зависимости синфазного  $\chi'$  и квадратурного  $\chi''$  сигналов диамагнитного отклика эпитаксиальной YBCO пленки при различных возбуждающих полях.  $H_{ac}$ : 1 — 1, 2 — 40 мЭ.

были изготовлены компенсационная 3 и фазовая 4 катушки. Поскольку чувствительность моста зависит от количества витков приемной катушки при заданной ее площади, а шум моста — от активного сопротивления приемной и компенсационной катушек, то оптимальным решением оказалось использование плоских катушек, намотанных тонким медным проводом высотой не более 1% от диаметра катушки.<sup>1</sup> Наши катушки намотаны медным проводом 0.02 мм, содержали по 500 витков каждая, имели внешний и внутренний диаметры 8 и 1.0 мм соответственно и высоту 0.15 мм. Катушки располагались соосно с катушкой возбуждения 1 внутри нее. Катушкой возбуждения является однослойный соленоид диаметром 14 мм и длиной 70 мм.

Важным элементом конструкции моста является сапфировый стержень 5. Он выполняет две основные функции. Во-первых, в области температур 4.2–120 К сапфир обладает хорошей теплопроводностью, что позволяет максимально выравнивать температуры приемной, компенсационной и фазовой катушек. С помощью сапфирового стержня достигается высокая термостабилизация моста при температурных измерениях ВТСП пленок. Во-вторых, являясь хорошим изолятором, сапфировый стержень выполняет роль пьедестала, на плоскопараллельные торцы которого приклеены приемная, компенсационная и фазовая катушки. Длина

<sup>1</sup> Диаметр приемной катушки выбирался из условий пренебрежения краевыми эффектами. Расчет распределения магнитного поля в пленочном сверхпроводящем образце показал [11], что аксиальное поле меняет свой знак на расстоянии  $0.8R$ , где  $R$  — радиус образца. Это обстоятельство способствует появлению краевых эффектов.

сапфирового стержня выбиралась из условия, чтобы поле образца не влияло на компенсационную катушку. В нашем случае она составляла 10 мм.

Данная конструкция моста позволяет сравнительно легко компенсировать паразитные сигналы до уровня ниже собственных шумов усилителя (менее  $20 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ ) в области частот 0.1–25 кГц при практически любой амплитуде возбуждающего поля. Полный переход в сверхпроводящее состояние пленки Nb размером  $10 \times 10 \text{ мм}$  и толщиной 0.1 мкм ( $V_s = 10^{-5} \text{ см}^3$ ) при амплитуде возбуждающего поля 1 мЭ и частоте 1 кГц вызывает изменение индуктивного напряжения во вторичной обмотке моста на 4 мкВ. Отношение сигнал/шум на выходе самописца при постоянной времени 1 с составляет не менее 100:1.

Для иллюстрации чувствительности описанного моста взаимной индуктивности на рис. 3 показаны температурные зависимости синфазного  $\chi'$  и квадратурного  $\chi''$  сигналов диамагнитного отклика эпитаксиальной YBCO пленки, обладающей высокой токнесущей способностью ( $j_c(0) = 3 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2$ ). Толщина пленки равна 0.3 мкм. В окрестности  $T_c$  зависимость  $\chi''(T)$  имеет один максимум. При уменьшении возбуждающего поля  $H_{ac}$  максимум расщепляется и в поле  $\sim 1 \text{ мЭ}$  наблюдается множественность близко стоящих пиков. Тонкая структура  $\chi''(T)$  обусловлена пространственной неоднородностью джозефсоновских контактов. Вследствие этого переменное поле  $H_{ac}$  индуцирует в пленке различные по величине замкнутые микроскопические токи, которые и определяют наблюдаемый диамагнитный отклик.

#### Список литературы

- [1] *Srivastava P.K., Debely P., Hintermann H.E. et al. // Physica C. 1988. Vol. 153–155. P. 1443–1444.*
- [2] *Katamoto K., Mazaki H., Yazuoka H. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1989. Vol. 28. N 9. P. L1568–L1570.*
- [3] *Гришин А.М., Дроботько В.Ф., Емельяничков Д.Г. и др // ФНТ. 1990. Т. 16. № 12. С. 1524–1530.*
- [4] *Содлен м., Скули, Эванс мл // Приборы для научных исследований. 1973. № 10. С. 96.*
- [5] *Перейра, Мейер и да Сильвейра // Приборы для научных исследований. 1983. № 7. С. 111.*
- [6] *Дилримп, Пробер // Приборы для научных исследований. 1984. № 6. С. 139.*
- [7] *Уайт Г. Экспериментальная техника в физике низких температур. М.: Физматгиз, 1961.*
- [8] *Бродбок, Бэкри и Хоксема // Приборы для научных исследований. 1978. № 9. С. 47.*
- [9] *Уитмор, Райен и Сандерс мл // Приборы для научных исследований. 1978. № 11. С. 80.*
- [10] *Осио и Хамманн // Приборы для научных исследований. 1985. № 7. С. 64.*
- [11] *Däumling M., Larbalestier D. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 40. N 13. P. 9350–9353.*

Донецкий физико-технический институт

Поступило в Редакцию  
22 июня 1992 г.