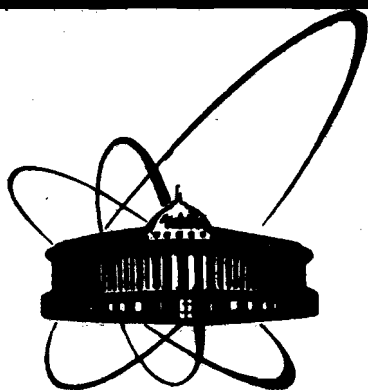


89-824



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

T 579

18-89-824

**Б. Тоот, Б. Сили, В. М. Назаров,  
П. Бодон, Г. Терштянски**

**ПРОСТОЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ СПОСОБ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВТСП**

**1989**

## Введение

С появлением высокотемпературной ( $T_c > 77 \text{ K}$ ) сверхпроводимости<sup>/1,2/</sup> резко выросла необходимость в быстром и точном измерении температуры перехода широкого класса веществ: кристаллов, тонких пленок, порошков и керамик.

Как правило, для этой цели четырехзондовым методом<sup>/3/</sup> определяют электрическое сопротивление образца. Этот метод наиболее наглядный, но создание четырех качественных, невыпрямляющих омических контактов довольно трудоемко и часто невозможно. Это ограничивает круг исследуемых веществ только массивными образцами.

С целью устранения этих ограничений был разработан способ и создан прибор для бесконтактного измерения переходной температуры ВТСН на основе явления взаимной индукции и идеального диамагнетизма сверхпроводящего состояния.

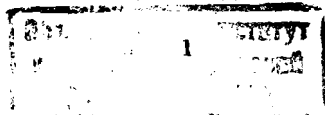
## Описание способа

Для выявления сверхпроводимости образец помещается в магнитную цепь переменного тока, а магнитная цепь в свою очередь связывает индуктивно два резонансных контура (см. рис. 1). Образец находится в зазоре ферритового кольца и пронизывается магнитным потоком.

В сверхпроводящем состоянии в образце индуцируются электрические токи, приводящие к снижению общего магнитного потока. Это снижение потока регистрируется вторичным контуром как изменение э. д. с. взаимной индукции.

## Чувствительность

Для повышения чувствительности частота возбуждающего напряжения настроена близко к резонансной частоте связанных контуров. Образец, как элемент связи, вносит большой вклад во взаимную индуктивность этих контуров вследствие применения ферритового кольца с зазором. Ферритовое кольцо также



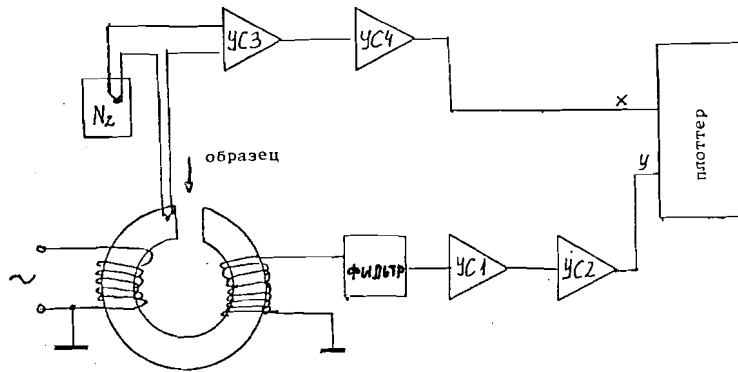


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема измерения.

обеспечивает фиксированную геометрию при измерениях и как магнитопровод ( $\mu \approx 10^4$ ) существенно снижает рассеянный магнитный поток.

В силу этих обстоятельств и посредством соответствующего подбора параметров резонансных контуров ( $R_1 = R_2$ ,  $l_1 = l_2$ ,  $M/L < 0.1$ ,  $R \ll \omega L$ ) можно вычислить с хорошей точностью амплитуду сигнала  $U_2$ , снятого с емкости второго контура при резонансе, и собственную резонансную частоту  $\omega_0$  контуров:

$$U_2 = (M/L) Q_2 U_1, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \{LC(1 - M^2/L^2)\}^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $M$  - взаимная индуктивность;  $L$  - индуктивность первичной и вторичной катушек;  $U_1$  - амплитуда возбуждающего напряжения;  $Q_2$  - добротность второго контура;  $C$  - емкость конденсатора.

Важно, что измеряемый сигнал оказался прямо пропорциональным взаимной индукции  $M$ , так как  $M$  сильно зависит от температуры, а остальные параметры проявляют слабую температурную зависимость.

Видно, что в резонансе из-за слабой связи ( $M/L < 0.1$ ) получился только один максимум, что соответствует наблюдениям, и  $\omega_0$  изменится меньше чем на 1% при полном снижении  $M$  до нуля.

Для составленной нами магнитной цепи переменного тока можно показать, что

$$M = \frac{N_1 N_2}{R_m} = \frac{N^2}{R_m}, \quad (3)$$

где  $N_1 = N_2 = N$  - число витков первичной и вторичной катушек;  $R_m$  - суммарное магнитное сопротивление цепи.

Примененный феррит имеет очень малые потери на гистерезис, поэтому его магнитное сопротивление - чисто вещественное. Индукция в нем не насыщается, т.е. относительная магнитная проницаемость  $\mu$  строго постоянна и не зависит от тока намагничивания.

Магнитная цепь представляет собой тороидальное кольцо квадратного сечения, состоящее из трех участков: феррита ( $\mu_f \approx 10^4$ ), воздушного зазора ( $\mu_z = 1$ ), сверхпроводящего образца в зазоре ( $\mu_s \leq 1$ ). Все эти участки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, т.е. предполагается, что поток не разветвляется и не рассеивается.

Поэтому магнитные сопротивления данных участков складываются последовательно:

$$R_m = \frac{l_f}{\mu_f \mu_0 A} + \frac{l_s}{\mu_s \mu_0 A} + \frac{l_z}{\mu_z \mu_0 A}, \quad (4)$$

где  $l_f$  - длина серединной окружности ферритового кольца;  $A$  - поперечное сечение кольца;  $l_s, l_z$  - толщина сверхпроводника и воздушного зазора, соответственно;  $\mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость вакуума, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Vs/Am.

Здесь предполагается, что сечение кольца  $A$  перекрывается полностью вставленным в него образцом. Для примененного феррита  $\mu_f \approx 10^4$  и  $l_f/l_z \approx 10$ , поэтому первым слагаемым можно пренебречь. Таким образом, магнитное сопротивление цепи определяется только зазором и находящимся в нем образцом ВТСП.

При понижении температуры ниже критической  $\mu_s$  стремится к нулю вследствие идеального диамагнетизма образца ВТСП. Это вызывает резкое возрастание  $R_m$  (см. формулу (4)), в принципе оно должно быть бесконечно большим. В результате этого  $M$  и  $U_2$  уменьшаются до нуля, что означает 100-процентное относительное изменение сигнала. В данном случае измерение прил. 1-процентного изменения частоты нецелообразно, в дальнейшем

измеряется амплитуда индуцированного сигнала. Эффектом 1-процентной расстройки контуров мы пренебрегаем, т.к. полоса пропускания контуров значительно выше.

Если зазор заполнен образцом ВТСП полностью, тогда формулу (1) для амплитудных значений можно переписать в виде

$$U_2 = \frac{N^2}{L} \cdot \frac{\mu_s \mu_0 A}{l_s} Q_2 U_1 = \text{const} \cdot \mu_s, \quad (5)$$

где  $\mu_s$  - относительная магнитная проницаемость образца ВТСП;  $l_s, A$  - толщина и площадь образца.

Из формулы (1) видно, что при коэффициенте связи  $M/L=0,1$ ,  $U_1=200$  мВ и  $Q_2=30$  амплитуда составляет 600 мВ, что позволяет практически без электронных шумов осуществить аналоговую обработку сигнала.

Из (7) ясно, что выходной сигнал  $U_2$  прямо пропорционален относительной магнитной проницаемостью образца, и если добиться слабой температурной зависимости параметров  $Q_2$  и  $\mu_s$ , то переход в сверхпроводящее состояние выявляется резким скачком сигнала  $U_2$  при температуре перехода.

Если образец не заполняет полностью зазор по толщине и/или по площади, то (5) легко обобщается на этот случай. Для более несимметричных резонансных контуров формулы (1) и (2) становятся более громоздкими, но описанный характер зависимостей сохраняется. Это же относится к случаю, когда измерение ведется не на резонансной частоте.

#### Техника измерения

На рис.1 приведена блок-схема прибора. Сигнал, снятый со второго контура, усиливается операционным усилителем в 10 раз, выпрямляется диодом и сглаживается фильтром. Из полученного сигнала постоянного тока вычитается опорное напряжение с помощью последующего операционного усилителя, и эта разность после усиления до нескольких вольт подается на вход "Y" двухкоординатного самописца. Вычитание регулируемого вручную опорного напряжения позволяет изучить соответствующие участки кривой  $U_2=U_2(T)$  в увеличенном масштабе.

Сигнал с дифференциальной термпары (опорная температура - точка кипения жидкого азота) через усилитель постоянного тока подается на вход "X" самописца. Термпара

Si-константан вклеена в углубление ферритового кольца вблизи зазора. Систематическая ошибка в определении температуры не превышает  $\pm 1$  К. Держатель образца плотно заключен в фторопластовом стакане и погружается в бытовой сосуд Дьюара с жидким азотом. По достижении теплового равновесия имеющийся уровень сигнала компенсируется с помощью схемы вычитания, держатель вынимается из жидкого азота и регистрируется разностный сигнал в зависимости от температуры.

Воспроизводимость измерения при охлаждении образца неудовлетворительная, поэтому все измерения проводились путем нагрева, когда намного легче поддерживать температурный режим образца. Нагрев образца происходил спонтанно, за счет теплоты окружающей среды, со скоростью 1-2 К/мин, что обеспечивало высокую воспроизводимость. Полученная кривая испытывает более или менее резкий скачок, в зависимости от свойства образца, на снятие одной кривой требуется не более 10-15 мин.

Перед каждым циклом измерений генератор синусоидального напряжения подстраивается на резонансную частоту связанных контуров (прибл. 15 кГц) и слегка рассогласуется в сторону меньших или больших частот (осциллографом проверяется падение амплитуды сигнала переменного тока до прибл. 80% от максимальной). В зависимости от знака фазы сигнала по обе стороны резонанса выходной сигнал на самописце также меняет знак, так как операционные усилители чувствительны к фазе. Таким образом, знак выходного сигнала зависит от настройки схемы и не является физическим эффектом. Для измерений подходит любой фиксированный знак. Важен не знак сигнала сам по себе, а скачкообразное изменение сигнала.

#### Результаты измерения

Измерения проводились на пластинках из керамических сверхпроводников ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и  $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_3O_8$ ) температура перехода которых была в пределах 85-100 К. Толщина пластин не превышала 3 мм, их площадь составляла 10-120 мм<sup>2</sup> и имели разнообразную форму. Температура перехода не зависела от формы и толщины образца.

На рис. 2. приведена измеренная зависимость сигнала взаимной индукции от температуры. Видно резкое снижение сигнала для YBCO, по которому можно определить  $T_c$ , она оказалась 94 К в хорошем согласии с независимым

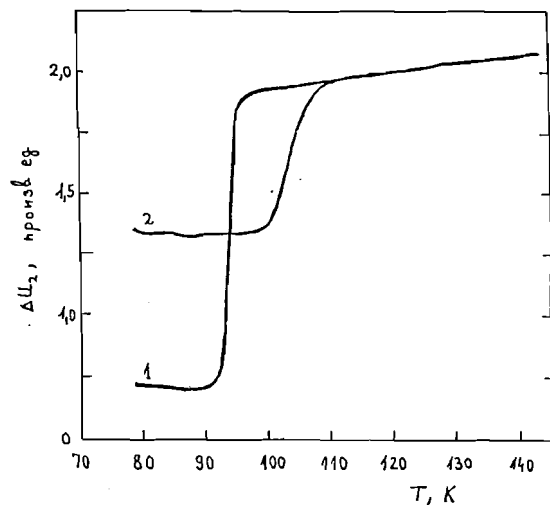


Рис. 2. Сигнал взаимной индукции в зависимости от температуры образца ВТСП.

четырёхзондовым измерением. Для  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_8\text{O}_8$  это снижение выражено не так резко, существует определенный температурный интервал (от 100 до 110 K), где происходит переход в сверхпроводящее состояние.

Дальнейшие особенности сигнала взаимной индукции, по-видимому, объясняются магнитной и структурной неоднородностью сверхпроводника и слабой температурной зависимостью параметров контура, на которых здесь не будем останавливаться.

#### Заключение

Предлагаемый способ, основанный на явлении взаимной индукции и идеального диамагнетизма сверхпроводников, позволяет быстро, без приготовления электрических контактов, измерять температуру и температурный интервал сверхпроводящего перехода. В качестве образцов ВТСП можно применять керамики, тонкие пленки и порошки. Возможно дальнейшее развитие способа для выявления магнитных неоднородностей в ВТСП.

#### Литература

1. J.G.Bednorz and K.A.Mueller, Z.Phys. B 64, 189(1986)
2. M.K.Wu, J.R.Ashburn, C.J.Torng, P.H.Hor, R.L.Meng, L.Gao, Z.J.Huang, Y.Q.Wang and C.W.Chu, Phys.Rev.Lett. 58, 908(1987)
3. L.J.Van der Pauw, Philips Res.Rep., 13,1(1968), 16,187(1961)

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 декабря 1989 года.