

05.4; 09; 12

© 1992

ПРИРОДА „ПИКОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ“
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ
ВБЛИЗИ T_c

Л.Б. Розенбаум

В работах [1–5] и др. приводятся результаты исследований высокочастотных (ВЧ) потерь в керамических и пленочных высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) на частотах $f \sim 10^6 - 10^7$ Гц. Эти исследования выполнялись индукционным методом: возле катушки индуктивности размещают исследуемый ВТСП-образец, и по изменению добротности LC колебательного контура, в который входит указанная катушка, судят о потерях ВЧ энергии в исследуемом образце.

Авторы указанных работ обнаружили при этом немонотонную зависимость потерь R в LC -контуре (добротности $Q = 2\pi fL/R$ LC -контура) от температуры T , а именно: вблизи температуры T_c сверхпроводящего перехода, обычно при $T \neq T_c$, наблюдается „пик поглощения“ – максимум на кривой $R(T)$ или соответственно минимум на кривой $Q(T)$.¹

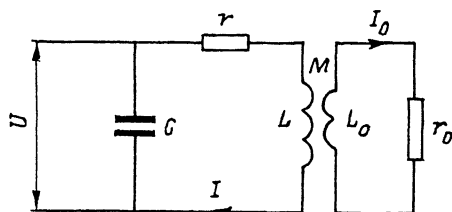
В указанных работах предпринимаются попытки объяснения этого „пика поглощения“. В [1] он приписывается „радиочастотному размерному эффекту“, в [2] его связывают с гранулярной структурой керамических сверхпроводников, в [3] с „БКТ-переходом“ (Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition).

Немонотонная зависимость $Q(T)$ вблизи T_c наблюдалась и нами при исследованиях различных керамических ВТСП-образцов индукционным методом. Однако объясняется эта немонотонность, с нашей точки зрения, достаточно просто и потому является очевидной.

Эквивалентная схема измерений (рис. 1) может быть представлена в виде LC -контура, индуктивно связанного с ВТСП-образцом, имеющим индуктивность L_0 и сопротивление потерь r_0 . На рис. 1 обозначено: через r – сопротивление потерь в LC -контуре при отсутствии исследуемого ВТСП-образца, M – взаимная индуктивность катушки и исследуемого образца, I – ток в LC -контуре, I_0 – ток в ВТСП-образце, V – напряжение на конденсаторе емкостью C . Возбуждение ВЧ-колебаний в LC -контуре может производиться различными способами. Та часть схемы, которая обеспечивает возбуждение ВЧ колебаний, на рис. 1 не показана.

¹ В работе [3] при этом ошибочно на фиг. 1 вместо R_s и R_c записано R_s^{-1} и R_c^{-1} .

Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема измерений индукционным методом.



Уравнения Кирхгофа для контуров, показанных на рис. 1, имеют вид

$$\dot{V} = (r + i\omega L)\dot{I} + i\omega M\dot{I}_0, \quad (1)$$

$$0 = (r_0 + i\omega L_0)\dot{I}_0 + i\omega M\dot{I}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, i — минимальная единица, \dot{V} , \dot{I} , \dot{I}_0 — комплексные амплитуды напряжения V и токов I , I_0 . ВЧ импеданс катушки

$$\dot{Z} = r + r_{\text{вн}} + i\omega(L + L_{\text{вн}}), \quad (3)$$

где $r_{\text{вн}}$ и $L_{\text{вн}}$ — вносимые сопротивление и индуктивность со стороны ВТСП-образца, причем $L_{\text{вн}} < 0$. Очевидно,

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \quad (4)$$

Из соотношений (1)–(4) легко найти, что

$$r_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2 r_0}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}, \quad (5)$$

$$L_{\text{вн}} = -\frac{\omega^2 M^2 L_0}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}. \quad (6)$$

Как следует из (5) и (6), зависимость $L_{\text{вн}}$ от r_0 является монотонной, а зависимость $r_{\text{вн}}$ от r_0 имеет максимум при $r_0 = \omega L_0$ (рис. 2).

Если при изменении температуры T ВЧ сопротивление потерь в ВТСП-образце, монотонно изменяясь (уменьшаясь при охлаждении образца), проходит через значение ωL_0 , то полное сопротивление потерь в контуре $R = r + r_{\text{вн}}$ будет обнаруживать максимум на кривой $R(T)$, а его добротность — минимум на кривой $Q(T)$.

Так как ВТСП-образцы имеют обычно большое ВЧ сопротивление r_0 при $T > T_c$ и малое при $T \ll T_c$, то значение ωL_0 чаще всего попадает в диапазон изменения ВЧ сопротивления $r_0(T)$ исследуемого образца (рис. 3), и, следовательно, так называемые „пики

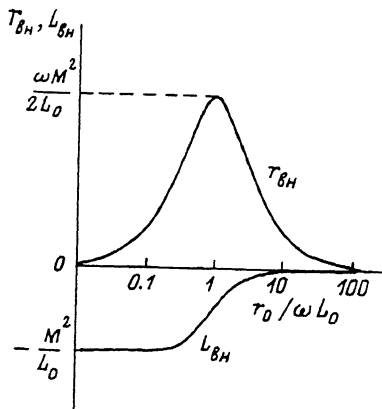


Рис. 2. Зависимости вносимых сопротивлений и индуктивности в колебательный LC -контур со стороны ВТСП образца от ВЧ сопротивления последнего.

ВЧ поглощения² в этих случаях наблюдаются. В тех же случаях, когда значение ωL_0 не попадает в диапазон изменения $\tau_0(T)$, пиков не будет. Последнее может иметь место либо для образцов, имеющих большие потери в сверхпроводящем состоянии ($|\tau_0|_{T < T_c} > \omega L_0$), либо для образцов, имеющих малые потери в нормально-проводящем состоянии ($\tau_0|_{T > T_c} < \omega L_0$).

Покажем, что предложенное объяснение хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Необходимое условие наблюдения „пиков ВЧ поглощения“

$$\tau_0|_{T \approx T_c} > \omega L_0 \quad (7)$$

(условие $\tau_0|_{T < T_c} < \omega L_0$ на частотах $f \sim 10^6 - 10^7$ Гц, как правило, выполняется).

Индуктивность диска диаметром D и толщиной a по отношению к круговому току

$$L_0 = \frac{\mu_0}{8\pi} D \Phi, \quad (8)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $\Phi = \Phi(a/D)$ — табличная функция [6]. При $a/D = 0.2$ $\Phi \approx 5.1$, при $a/D \rightarrow 0$ $\Phi \rightarrow 7.0$. Сопротивление диска по отношению к тому же току

² Для простоты считаем, что L_0 и M не зависят от T . Учет зависимостей $L_0(T)$ и $M(T)$, которые обычно являются слабыми, не меняет существа вопроса.

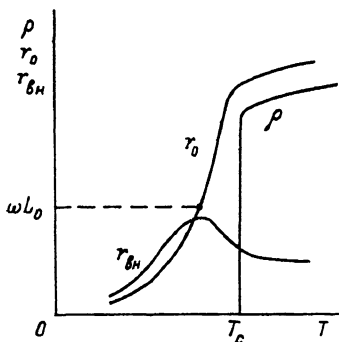


Рис. 3. Зависимости ВЧ сопротивления r_0 , удельного объемного сопротивления ρ и ВЧ вносимого сопротивления $r_{вч}$ ВТСП-образца от температуры.

$$r_0|_{T \gg T_c} \approx \frac{\pi \rho}{a} \quad \text{при } \delta_{сч} \gg a, \quad (9)$$

$$r_0|_{T \gg T_c} \approx \pi R_s = \pi \sqrt{\pi \mu_0 f \rho} \quad \text{при } \delta_{сч} \ll a, \quad (10)$$

где ρ и R_s - удельное и поверхностное сопротивление диска, а $\delta_{сч}$ - глубина проникновения при $T \gg T_c$.

В [3] исследовалась монокристаллическая пленка системы $YBaCuO$ при $f \approx 12-16$ МГц, имеющая $a=0.5$ мкм, $\rho \approx 25$ мкОм·см. В этом случае $\delta_{сч} \gg a$, и в соответствии с (8) и (9), можно найти, что условие (7) выполняется при $D < 60$ мм. Так как в [3] наверняка было $D < 60$ мм, то условие (7) было выполнено, и, следовательно, „пик ВЧ поглощения“ должен наблюдаться.

В [1] исследовались керамические $YBaCuO$ -диски. Образец № 1 ($a=3.63$ мм), по данным авторов, имел при $f=7.95$ МГц $\delta_{сч} < a$, а при $f=1.66$ МГц $\delta_{сч} > a$. Отсюда вытекает, что у данного образца ρ находится в пределах от 0.01 до 0.04 Ом·см. Принимая $\rho \approx 0.02$ Ом·см и $D \approx 20-30$ мм, найдем из (8)-(10), что при $f=7.95$ МГц $r_0|_{T \gg T_c} \approx (0.17-0.24)$ Ом, а $\omega \omega_0 \approx (0.25-0.37)$ Ом. В этом случае пик наблюдаться не должен. При $f=1.66$ МГц из (8) и (9) находим: $r_0|_{T \gg T_c} \approx 0.17$ Ом, $\omega \omega_0 \approx (0.05-0.07)$ Ом, т. е. условие (7) выполнено, и пик должен наблюдаться. Образец № 2 ($a=2.1$ мм) имел меньшую плотность и, следовательно, большее ρ , чем образец № 1. Следовательно, для него условие (7) выполняется как при $f=1.66$ МГц, так и при $f=7.95$ МГц, и он должен обнаруживать пики в обоих случаях.

Все выводы о присутствии или отсутствии „пиков поглощения“ соответствуют экспериментальным данным.

Таким образом, наблюдаемые при измерениях индукционным методом температурные „пики ВЧ поглощения“ имеют, скорее всего, аппаратное происхождение (присущи индукционному методу) и не связаны с какими-либо физическими особенностями и немонотонностями в поведении ВТСП материалов на высоких частотах.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] И ж и к Э.В., К и р и ч е н к о А.Я., Р е в е н к о Ю.Ф., С в и с т у н о в В.М., Ч е п р а к И.Т. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 7. С. 1-5.

- [2] И ж и к Э.В., К и р и ч е н к о А.Я., Р е в е н к о Ю.Ф.,
С в и с т у н о в В.М., Ч е п р а к И.Т., Я к о в е н к о В.М.
// ДАН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1989. В. 5.
С. 51-54.
- [3] G a s p a r o v V.A., B i c h k o v a T.M., P a -
v u n a D. // IV Bilateral Soviet-German Seminar
on High Temperature Superconductivity, 6-13, Octo-
ber, 1991, St. Petersburg, P. 93-96.
- [4] G a s p a r o v V.A., O g a n e s y a n A.P. //
Physica C. 178. 1991. P. 445.
- [5] К и р и ч е н к о А.Я., Ч е п р а к И.Т. В сб.: Твердотель-
ная электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазо-
нов. Харьков: ИРЭ АН УССР. 1988. С. 112-116.
- [6] К а л а н т а р о в П.Л., Ц е й т л и н Л.А. Расчет индук-
тивностей. Л.: Энергия. 1970. С. 229.

Поступило в Редакцию
29 июля 1992 г.