

НАБЛЮДЕНИЕ ФЛУКТУАЦИОННОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ КУПЕРОВСКИХ ПАР В ГРАНУЛИРОВАННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

В.М.Свистунов, Ю.Ф.Ревенко

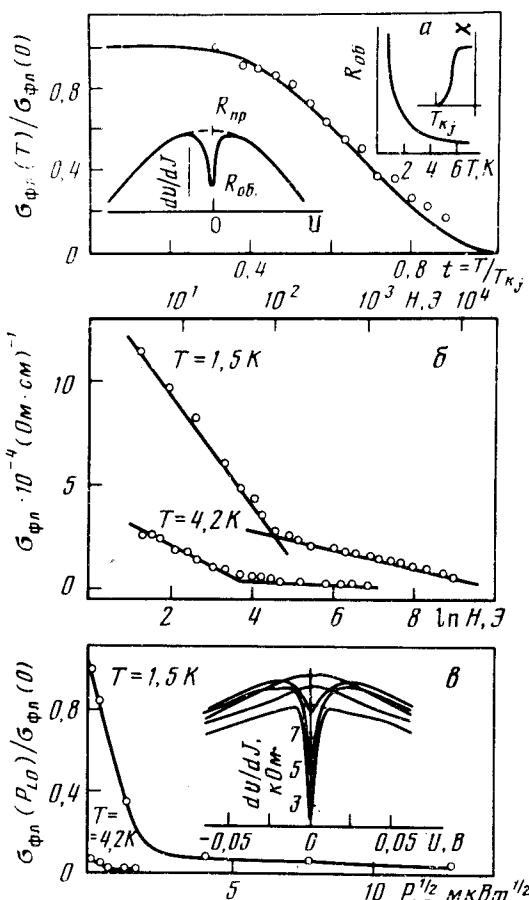
В дифференциальном сопротивлении гранулированных композитов обнаружены "нулевые" аномалии, которые обусловлены флюктуационной туннельной проводимостью куперовских пар. Изучены температурные, полевые и электромагнитные зависимости этой выделенной компоненты проводимости.

В гранулированных сверхпроводниках (ГСП) с джозефсоновским взаимодействием переход в фазокогерентное состояние в окрестности фазового перехода металл – диэлектрик сильно размыт по температуре, проявляется минимум в сопротивлении и наблюдаются эффекты возвратных явлений¹. Существует ряд моделей, описывающих поведение таких сверхпроводников. Так, в рамках периодической модели подавление сверхпроводимости объясняется учетом короткодействующей части электростатической зарядовой энергии и вкладом кулоновского взаимодействия гранул^{3–5}. Для крупнозернистых ГСП параметр порядка отдельных гранул сохраняется невозмущенным³, а потеря длиннодействующей фазовой когерентности в случае полупроводниковой⁴ и переколяционной⁶ моделей в большей степени связывается с ослаблением джозефсоновской связи в результате уменьшения барьерной прозрачности между гранулами границ. В двумерных гранулированных пленках возвратные явления могут быть обусловлены влиянием квантовых флюктуаций на диссоциацию термических чихревых пар⁷. Анализ существующих моделей подчеркивает сложность проблемы фазокогерентного состояния в трехмерных ГСП⁸. Поэтому экспериментальные работы, направленные на выявление механизмов проводимости гранулярных сверхпроводников, представляются весьма актуальными.

Объектом исследования выбраны композиты со структурой первовскита $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ (ВРВ).

Ранее нами в этих материалах наблюдалась эффекты возвратных явлений в температурных зависимостях критического тока и сопротивления, а в их дифференциальном сопротивлении выявлены узкие нулевые аномалии проводимости, связанные со спецификой ГСП².

Исследования проведены на массивных крупнозернистых образцах ВРВ с $x = 0,2 \div 0,3$; $d_{\text{зерн}} \cong 1 \div 10 \text{ мкм}$; $l \cong 10 \times 1 \times 1 \text{ мм}^3$, приготовленных по методу твердофазной диффузии из BaPbO_3 и BaBiO_3 ¹⁾. Для ускорения диффузационных процессов, приводящих к поверхностной диэлектризации гранул, готовые образцы выдерживались в вакууме 10^{-5} Торр. Такие ВРВ имели полупроводниковый ход во всем температурном диапазоне (до $T = 1,5 \text{ K}$), а измерения восприимчивости показывали полный сверхпроводящий переход с $T_k^X = 6 \div 10 \text{ K}$. В эксперименте изучались температурные, магнитные и электромагнитные зависимости дифференциального сопротивления $dU/dJ(U)|_{T,H,P_{LO}}$. Из характеристик $dU/dJ(U)$ выделялись фоновая "пръжковая" $\sigma_{\text{пр}}$ и флюктуационная $\sigma_{\text{фл}}$ компоненты проводимости ВРВ (см. рисунок). Значение $R_{\text{пр}}(0)$, обязанное межзеренному сопротивлению, находилось аппроксимацией по квадратичному закону фоновой части кривой $dU/dJ(U)$ из области больших напряжений в район аномалии. Флюктуационная составляющая $\sigma_{\text{фл}}(0)$ определялась как $\sigma_{\text{фл}}(0) = \sigma_{\text{обр}}(0) - \sigma_{\text{пр}}(0)$. Измерения проведены на ряде образцов с $\rho_{10 \text{ K}} = 1 \div 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в криостате с пермалоевыми противомагнитными экранами, обеспечивающими компенсацию наводок до 10^{-2} Э. Для снятия зависимостей $dU/dJ(U)$ применялась модуляционная методика, получившая распространение в туннельных исследованиях³.



Температурные, полевые и электромагнитные зависимости флюктуационной компоненты проводимости композита $\text{BaPb}_{0,8}\text{Bi}_{0,2}\text{O}_3$. Экспериментальные значения $\sigma_{\text{фл}}(T)$ представлены в сравнении с теоретической зависимостью, полученной в переколляционной модели гранулированного сверхпроводника⁴. На вставках показаны: температурный ход полного сопротивления и восприимчивости образца (рис. а, справа), характерный вид его дифференциального сопротивления ниже T_{kj} (рис. а, слева) и влияние на него поля СВЧ (рис. в).

На рисунке представлены типичные температурные (T), магнитные (H_{\parallel}) и электромагнитные (P_{LO}) зависимости $\sigma_{\text{фл}}(0)$ для образца ВРВ ($x = 0,2$) с $\rho_{10 \text{ K}} = 18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, у которого

¹⁾ Авторы выражают благодарность Д.П.Моисееву и А.П.Гаевскому за предоставленные образцы.

резко возрастают $R_{\text{обр}}(T)$ ниже температуры сверхпроводящего перехода зерен ($T_k^X = 6$ К, см. вставку рис. а). "Нулевая" аномалия в $dU/dJ(U)$ появляется при температуре $T_{kj} \cong 5$ К соответствующей зарождению джозефсоновских межзеренных связей в керамике. Изменение $\sigma_{\Phi\text{л}}(T)$ описывается законом

$$\sigma_{\Phi\text{л}}(T) \sim \left[\frac{\Delta(T)}{k_B T} \operatorname{th} \left(\frac{\Delta(T)}{2k_B T} \right) \right]^2,$$

полученным в рамках перколяционной модели⁶ для термически возбужденных туннелирующих куперовских пар в ГСП. Эффекты зарядовой энергии зерен здесь не существенны из-за большого размера гранул.

Магнитное поле подавляет "нулевую" аномалию в $dU/dJ(U)$. Ход $\sigma_{\Phi\text{л}}(H)$ аналогичен кривой $J_c(H)$ для ВРВ, у которых сверхпроводящий ток не подавлен "прыжковой" компонентой сопротивления поверхностного слоя гранул. В $\sigma_{\Phi\text{л}}(H)$ выделены две области изменения (рис. б).

В первой – быстрые изменения $\sigma_{\Phi\text{л}} \sim 1/H$ ($H < 200$ Э) обусловлены потерей фазовой когерентности джозефсоновских связей на фрагментах перколяционного кластера, для которых вектор магнитного поля лежит в плоскости межзеренных туннельных переходов. Во второй области ($H > 200$ Э) слабые изменения оставшейся части $\sigma_{\Phi\text{л}}(H)$ (они заканчиваются в полях H_c , переходом зерен в нормальное состояние) можно объяснить проникновением абрикосовских вихрей в матрицу гранул, либо подавлением сверхпроводимости оставшихся слабых металлических межзеренных связей. Возможно здесь проявление и структурных неоднородностей.

Электромагнитное поле сверхвысоких частот наиболее эффективно воздействует на сверхпроводящие аномалии сопротивления в ВРВ (рис. в). Уже малые мощности облучения ($P_{LO} \cong 5$ мкВт, $f = 2$ Гц) практически полностью подавляют "нулевую" аномалию в $dU/dJ(U)$. Эти изменения в $\sigma_{\Phi\text{л}}(U)|_{P_{LO}}$ не могут быть связаны с тепловым воздействием поля на среду, ибо фоновое сопротивление $R_{\text{пр}}$, чувствительное к температуре, остается практически неизменным в $dU/dJ(U)$ при указанной мощности СВЧ. Его уменьшение заметно лишь при $P_{LO} > 100$ мкВт. Зависимость $\sigma_{\Phi\text{л}}(P_{LO}^{1/2})$ аналогична поведению $\sigma_{\Phi\text{л}}(H)$. Скорость ее изменения при малых мощностях составляет $dR_{\Phi\text{л}}/dP_{LO} \cong 14 \cdot 10^9$ Ом/Вт. Отмеченные динамические процессы в проводимости ВРВ при воздействии СВЧ полей могут быть обусловлены джозефсоновской природой.

В рамках перколяционной модели для трехмерной джозефсоновской среды⁶ совокупность полученных результатов объясняется наличием флюктуационной сверхпроводящей компоненты проводимости. В пористой керамике ВРВ локальные вариации потенциальных барьеров между гранулами приводят к неоднородному распределению силы межзеренной связи, в результате чего статическое фазокогерентное состояние устанавливается на отдельных участках токопроводящего пути образца. Слабая джозефсоновская связь легко разрушается транспортным током, что ведет к росту сопротивления перколяционного кластера. Данный процесс приводит к "нулевой" аномалии проводимости. Характерной особенностью ВРВ является наличие у них дополнительного разупорядочивающего механизма, связанного с образованием аморфного полупроводникового слоя на поверхности гранул, приводящего к электронной локализации. При этом наблюдается, в противоположность выводам работы¹⁰, переход от эффектов перколяции к локализации и в гранулярных материалах с крупными зернами. Этот доминирующий эффект локализации приводит к ослаблению флюктуационной компоненты проводимости с понижением температуры у ВРВ с $\rho_{10\text{ K}} > 100$ Ом · см². Нам представляется, что поведение ВРВ в магнитных и СВЧ полях обусловлено подавлением фазо-когерентного состояния фрагментов бесконечного кластера и возможным переходом системы в состояние "спинового стекла". Переход в это состояние происходит в полях, соответствующих кванту потока через межзеренный замкнутый контур с размерами $0,1$ мкм², что согласуется с электронно-микроскопическими данными.

В заключение подчеркнем, что применение модуляционного метода оказывается чрезвычайно эффективным в изучении проводимости гранулярных сверхпроводников. Эксперименты позволили выявить новые особенности фазо-когерентного состояния высокорезистивных композитов $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ и обнаружить их высокую чувствительность к внешнему электромагнитному излучению.

Литература

1. Kobayashi S., Tada Y., Sasaki W. J. Phys. Soc. Japan., 1980, **49**, 2075.
2. Свищунов В.М., Ревенко Ю.Ф., Моисеев Д.П., Постников В.М., Гаевский А.П. ФНТ, 1985, **11**, 1133.
3. Simanek E. Phys. Rev. B, 1981, **23**, 5762.
4. Jmry J., Strongin M. Phys. Rev. B, 1981, **24**, 6353.
5. Ефетов К.Б. ЖЭТФ, 1980, **78**, 2017.
6. Simanek E. Phys. Rev. B, 1982, **25**, 237.
7. Maekawa S., Fukuyama H., Kobayashi S. Solid. State Comm., 1981, **37**, 45.
8. Fazekas P., Mühlischlegel B., Schröter M. Z. Phys., 1984, **B57**, 193.
9. Свищунов В.М., Белоголовский М.А. ТунNELЬНАЯ спектроскопия квазичастичных возбуждений в металлах. Киев: Наукова думка, 1986.
10. Deutscher G., Goldman A.M., Hicklitz H. Phys. Rev. B, 1985, **31**, 1679.

Донецкий физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
14 июля 1986 г.