

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МОСТИКОВ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*А.С.Афанасьев, В.Н.Губанков, Ю.Я.Дивин,
П.М.Шадрин*

Влияние размеров (w, l) пленочных мостиков на их электропроводность связывается с существованием крупномасштабных перколяционных процессов с радиусом корреляции L , много большим размера гранул a . В таких мостиках нестационарный эффект Джозефсона наблюдается при выполнении условий $\xi(0) \ll a < w, l < L$.

Гранулированные ВТСП-пленки представляют особый интерес для изучения физики неупорядоченных сверхпроводниковых систем. Их своеобразие по сравнению с пленками из традиционных сверхпроводников^{1, 2} связано прежде всего с малой длиной когерентности

$\xi(0)$, так что отношение $\xi(0)$ к характерному размеру гранул a (~ 1 мкм) составляет $10^{-3} \div 10^{-4}$. Вследствие этого обстоятельства свойства пленок в широкой области температур от $T \rightarrow 0$ и вплоть до критической температуры обусловлены совокупностью джозефсоновских слабых связей между гранулами³. Такая джозефсоновская среда обладает перколяционным механизмом проводимости как вследствие статистического разброса параметров межгранульных связей и размеров гранул⁴, так и вследствие специфического влияния тепловых флуктуаций на джозефсоновские слабые связи⁵. Наиболее сильно особенности протекания тока в такой среде должны сказываться при уменьшении ее характерных размеров.

Нами исследовалось электросопротивление тонкопленочных мостиков из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Исходные пленки были получены на подложках из BaF_2 методом магнетронного распыления⁶ и имели размеры гранул $(0,5 \div 3)$ мкм, толщину $(0,5 \div 1)$ мкм. Величины сопротивления квадрата пленки R_{\square} при температуре 300 К составляли от единиц до десятков Ом/□. Из каждой исследовавшейся пленки методом фотолитографии изготовливалось семейство мостиков с ширинами от 5 до 200 мкм и отношением длины l мостика к его ширине w от 1 до 10. Часть мостиков после изготовления и нанесения на контактные площадки серебро-содержащего клея отжигалась в атмосфере кислорода. Последняя операция не оказывала качественного воздействия на наблюдаемые в данной работе эффекты.

На рис. 1 представлены характерные температурные зависимости сопротивления $R_{\square}(T)$ для семейства мостиков различных размеров, изготовленных из одной пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Температуры T_{c0} начала перехода в сверхпроводящее состояние для всего семейства мостиков совпадают между собой, что свидетельствует об отсутствии влияния

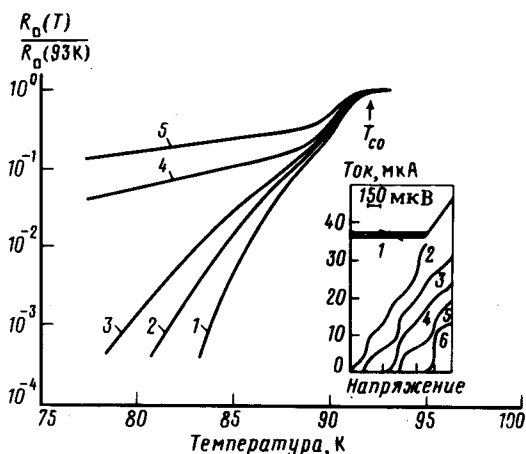


Рис. 1

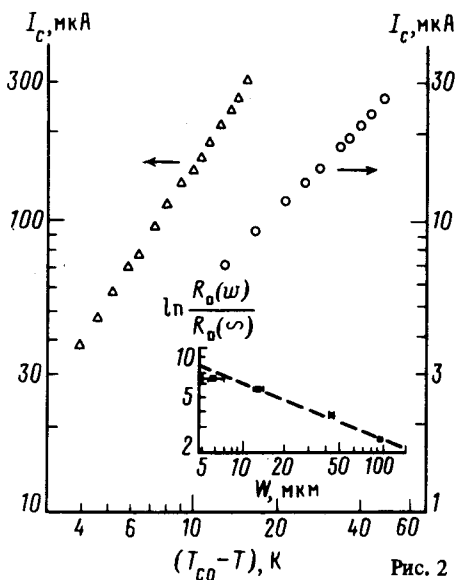


Рис. 2

Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления $R_{\square}(T)$ мостиков, изготовленных из пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и имеющих размеры $w \times l$ (мкм): 1 – 196×2000 ; 2 – 94×1000 ; 3 – 45×500 ; 4 – 13×70 ; 5 – 6×16 . На вставке приведены ВАХ мостика 6×16 мкм при увеличении мощности СВЧ излучения с частотой 74 ГГц. Кривые 3 – 6 смещены на 150 мкВ относительно друг друга, $T = 5$ К

Рис. 2. Температурные зависимости критических токов мостиков с шириной w (мкм): Δ – 70 мкм; \circ – 6 мкм. На вставке показана зависимость $\ln[R_{\square}(w)/R_{\square}(\infty)]$ от w для семейства мостиков при $T = 83$ К. Штриховая линия – теоретическая зависимость при $\nu = 2,5$

фоголитографии на свойства и состав материала мостиков. В низкотемпературной области перехода зависимости $R_{\square}(T)$ имеют экспоненциальный характер, $\lg R_{\square} \sim -(T_{c0} - T)^{\alpha}$ с показателем $\alpha = (1 \div 1,5)$ для различных мостиков. С уменьшением ширины мостика величина R_{\square} возрастала, а резкий экспоненциальный спад $R_{\square}(T)$ сменялся более плавным. Это изменение величины и хода $R_{\square}(T)$, как правило, становилось особенно явным при уменьшении ширины мостика ниже ~ 100 мкм. Изменение длины l мостиков при $l \geq 100$ мкм не оказывало существенного влияния на величину R_{\square} . С понижением w , $l < (50 \div 100)$ мкм разброс величин R_{\square} , измеренных для различных реализаций мостиков, возрастал и для уменьшения этого разброса измерения R_{\square} проводились для мостиков с $l \gg w$.

У мостиков с размерами w , $l < (50 \div 100)$ мкм проявлялись джозефсоновские свойства и степень их выраженности была значительной, даже если w , l были существенно больше размера a гранул пленки. На вставке рис. 1 представлена эволюция ВАХ мостика 6×16 мкм под действием СВЧ сигнала с частотой $f = 74$ ГГц при $T = 5$ К. Видно, что с ростом мощности излучения (кривые 1 – 6) происходит осциллирующее изменение критического тока I_c и токовых ступенек I_n , возникающих при напряжениях $V_n = nhf/2e$, $n = 1, 2, 3...$ Эти осцилляции являются характерным признаком существования в мостике соотношения ток–фаза, близкого к синусоидальному. Джозефсоновские ступеньки тока у этого мостика наблюдались при увеличении температуры до 60 К. При увеличении размеров мостиков (w , $l \sim (20 \div 50)$ мкм) джозефсоновские ступени тока становились слабее, а их осцилляции в СВЧ поле – менее выраженными или вообще отсутствовали.

Интерпретацию наблюдаемых размерных эффектов можно провести на основе модели ⁵, согласно которой пленка представляет собой сеть из межгранульных джозефсоновских слабых связей, имеющих различные значения критических токов I_{ci} и вследствие этого экспоненциально различающиеся значения сопротивлений $R_i \sim \exp(-\hbar I_{ci}/ekT)$. Используя подход, предложенный Шкловским и Эфросом ⁷, можно показать, что в низкотемпературной области сверхпроводящего перехода $R_{\square}(T)$ пленки пропорционально $\exp(-\hbar I_{cm}/ekT)$, где I_{cm} – наименьший критический ток в бесконечном кластере из слабых связей с $R_i \leq R_m$, создающих протекание тока в пленке ⁵. Подобные температурные зависимости $R_{\square}(T)$ с учетом $I_c \sim (T_{c0} - T)^{\alpha}$ наблюдались нами для всех исследованных пленок. Температурные зависимости $I_c \sim (T_{c0} - T)^{\alpha}$ с $\alpha \approx 1$ и 1,5 для мостиков различной ширины представлены на рис. 2. Радиус корреляции L бесконечного кластера в пленке гораздо больше размера гранул. При уменьшении поперечного размера $w < L$ образование бесконечного кластера затруднено и сопротивление пленки возрастает: $R_{\square} \approx R_{\square}(\alpha) \exp[B(a/w)^{1/\nu}]$ ⁷, где $R_{\square}(\alpha)$ – сопротивление квадрата пленки с $w \gg L$, ν – критический индекс радиуса корреляции, $B(T)$ – константа, возрастающая с увеличением разброса сопротивлений R_i в исходной сети. На вставке рис. 2 представлен график экспериментальной зависимости $\ln[R_{\square}(w)/R_{\square}(\alpha)]$ от w в двойном логарифмическом масштабе, позволяющий определить значения индекса ν ⁷. Оказалось, что увеличение R_{\square} мостиков с уменьшением w описывается теоретической зависимостью $R_{\square}(w) \propto w^{\nu}$ с $\nu = 2,5 \pm 0,5$ при $R_{\square}(\alpha) = R_{\square}(194 \text{ мкм})$.

Характерные масштабы перколяционных процессов в исследованных пленках оценивались нами с помощью локального лазерного зондирования ⁸. На рис. 3 показана пространственная зависимость изменения напряжения $\Delta V(x) \sim [I(dR/dT)\Delta T]_x$ на пленке при ее слабом ($\Delta T \ll T$, $T = 84$ К) локальном нагреве излучением He–Ne-лазера в точке x . Хорошо видна концентрация тока в нескольких хорошо проводящих каналах, расположенных на среднем расстоянии ~ 100 мкм друг от друга, что позволяет оценить величину радиуса корреляции $L \sim 100$ мкм для исходной пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Это значение L объясняет наблюдаемое нами наличие джозефсоновских свойств у мостиков с $w, l < L$, так как изменение размеров w , l меньше радиуса корреляции бесконечного кластера способствует выделению единичной слабой связи в мостике.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии крупномасштабных ($sL \gg a$) перко-

ляционных процессов в гранулированных пленках из сверхпроводников с весьма малыми значениями длины когерентности $\xi(0) \ll a$, экспоненциальном возрастании сопротивления точечных мостиков при уменьшении их поперечных размеров $w < L$ и возможности реализации джозефсоновской слабой связи в мостиках с размерами $\xi(0) \ll a < w, l < L$.

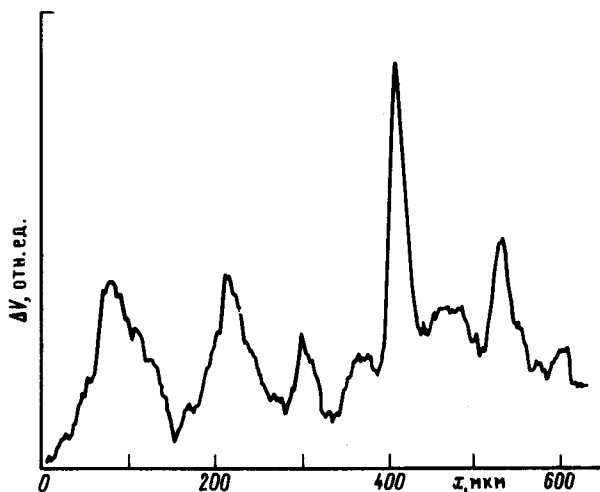


Рис. 3. Данные локального лазерного зондирования пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, исходной для семейства мостиков, представленных на рис. 1

Авторы благодарят И.М.Котелянского за приготовление мостиков, Ф.Я.Надя и В.Я.Покровского за помощь в экспериментах по лазерному зондированию.

Литература

1. Inhomogeneous Superconductors, 1979, Ed. Gubster D.U. et al, 1980.
2. Антонова Е.А., Рузинов В.Л. Письма в ЖЭТФ, 1988, 48, 323.
3. Clem J.R. Physica C, 1988, 153 – 155, 50.
4. Мейлихов Е.З., Гершанов Ю.В. В сб.: Сверхпроводимость, 1988, вып. 3, с. 55.
5. Афанасьев А.С. и др. ФНТ, 1989, 15, 322.
6. Гуляев Ю.В. и др. Письма в ЖТФ, 1988, 14, 761.
7. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
8. Перов А.П. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 327.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
14 апреля 1989 г.
После переработки
22 мая 1989 г.