Физика низких температур, 1996, т. 22, № 12, с. 1371–1374

Влияние электромагнитного поля на критические токи сверхпроводникового канала

В. М. Дмитриев, И. В. Золочевский, Е. В. Христенко

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail:dmitriev@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 12 мая 1996 г.

Приводятся результаты исследований влияния электромагнитного поля на токи возникновения центров проскальзывания фазы в сверхпроводниковом канале. Показано, что возможна стабилизация резистивного состояния канала под воздействием джозефсоновского излучения центра проскальзывания фазы.

Наведено результати досліджень впливу електромагнітного поля на струми виникнення центрів просковзування фази у надпровідниковому каналі. Показано, що є можливою стабілізація резистивного стану канала під впливом джозефсонівського випромінювання центра просковзування фази.

PACS: 74.40.+k; 74.60.Jg

Сверхпроводниковыми каналами обычно называют сверхпроводники, поперечные размеры которых меньше, чем длина когерентности Гинзбурга—Ландау $\xi(T)$ и глубина проникновения магнитного поля $\lambda(T)$, что приводит к однородному распределению плотности тока и параметра порядка по сечению образца.

При пропускании постоянного тока меньше критического I_c сверхпроводниковый канал находится в сверхпроводящем состоянии. При достижении током величины I_c в канале появляется первый центр проскальзывания фазы (ЦПФ) [1,2] с динамическим сопротивлением R_{d1}. Такое резистивное состояние канала сохраняется в интервале токов $\Delta I_1 = I_{c2} - I_{c1}$, где $I_{c1} \equiv I_c$ — критический ток Гинзбурга—Ландау; I_{c2} — ток, при котором в канале возникает второй ЦПФ. Резистивное состояние канала с двумя ЦПФ сохраняется в интервале токов $\Delta I_2 = I_{c3} - I_{c2}$, где I_{c3} — ток, при котором в канале возникает третий ЦПФ. С увеличением постоянного тока образуются все новые ЦПФ, пока весь канал, наконец, не перейдет в нормальное состояние. При этом наблюдается качественное совпадение поведения измеренных критических токов I_{ci} как функции i ($i = 1, 2, 3 \ldots$ — порядковый номер ЦПФ) [1,3] и предсказанного в [4,5]. Однако оказывается, что расстояния между вольтовыми ступеньками ΔI_i увеличиваются с ростом порядкового номера ЦПФ быстрее, чем это ожидается в теории, т.е. возникновение i-го ЦПФ происходит при токе I_{ci} большем, чем I_{ci}, рассчитанный для ЦПФ со слабо взаимодействующими ядрами. Причиной такого расхождения, по-видимому, является влияние возникшего ЦПФ на оставшуюся сверхпроводящую часть канала.

При экспериментальном исследовании неравновесных состояний вискеров из олова с многопотенциальными выводами было показано [3], что ЦПФ, находящиеся на расстояниях друг от друга гораздо больших длины когерентности ξ (≈ 300 мкм) и глубины проникновения продольного электрического поля в сверхпроводник L_E, взаимодействуют друг с другом. Это проявляется в том, что возникновение ЦПФ при токе I_{ci} в одной части канала может сопровождаться увеличением тока возникновения $I_{c(i+1)}$ следующего ЦПФ, находящегося в другой части канала. Объяснить это явление диффузией квазичастичного тока, квазичастичной инжекцией или экстракцией не представляется возможным [3]. Отсюда следует вывод, что это — длиннодействующее взаимодействие. На наш взгляд, привлекательной выглядит гипотеза Тидекса [3] о влиянии на сверхпроводящие свойства канала джозефсоновского электромагнитного поля ЦПФ. Чтобы проверить эту гипотезу, необходимо исследовать влияние электромагнитного поля на критические токи I_{ci} центров проскальзывания фазы, возникающих в сверхпроводниковом канале. Этому и посвящена настоящая работа.

© В. М. Дмитриев, И. В. Золочевский, Е. В. Христенко, 1996

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Приводимые ниже результаты экспериментальных исследований получены на планарных образцах из олова, параметры которых представлены в таблице.

Таблица

Параметры исследованных планарных образцов из олова

Образец	l	w	d, Å	$R_{4.2}$	R_{300}	T_c, K
	мкм			Ом		
Sn-3	25	1,0	730	5,50	51,20	3,821
Sn-12	35	1,0	710	5,48	64,73	3,812

На рис. 1 показана зависимость разности $\Delta I_1 = I_{c2} - I_{c1}$ между токами, при которых первая и вторая вольтовые ступени появляются на ВАХ образца Sn-12, от мощности электромагнитного поля для частот f = 23 390 (кривая *1*) и 15 460 МГц (кривая *2*). При таких частотах облучения мы наблюдаем стимуляцию сверхпроводимости, т. е. с ростом мощности облучения увеличиваются значения критических токов I_{ci} (рис. 1, вставка). Из рис. 1 видно, что с увеличением мощности облучения интервал $\Delta I_1\ (P/P_c)$ сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться. Это происходит из-за того, что I_{c1} и I_{c2} зависят от мощности облучения P по-разному: с увеличением P критический ток I_{c2} возрастает быстрее, чем I_{c1}, но затем увеличение I_{c2} замедляется и при некоторой мощности P_N ток I_{c2} становится равным I_{c1}. Это означает, что при данной мощности центры проскальзывания фазы возникают лавинообразно, при этом канал из сверхпроводящего состояния переходит в нормальное. Следует подчеркнуть, что с уменьшением частоты облучения величина максимума $\Delta I_1(P/P_c)$ уменьшается и сдвигается в область бóльших значений мощностей P/P_c.

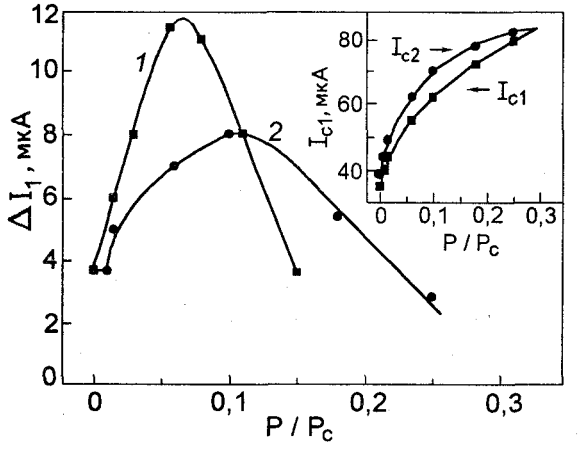

Рис. 1. Зависимость разницы между величинами токов $\Delta I_1 = I_{c2} - I_{c1}$, при которых первая и вторая вольтовые ступени появляются на ВАХ образца Sn−12, от мощности внешнего электромагнитного поля при частоте f = 23 390 (*1*) и 15 460 МГц (*2*) при T = 3, 774 К. Вставка: зависимости критических токов I_{c1} (■) и I_{c2} (●) образца Sn-12 от мощности микроволнового поля, частота которого f = 15 460 МГц.

При облучении канала электромагнитным полем, частота которого ниже граничной частоты стимуляции, мы наблюдаем подавление сверхпроводимости. В этом случае с увеличением мощности облучения критические токи I_{c1} и I_{c2} уменьшаются, причем подавление I_{c2} происходит медленнее, чем подавление I_{c1}. Следовательно, $\Delta I_1(P/P_c)$ при этом увеличивается.

Эффект стабилизации резистивного состояния, который проявляется в увеличении $\Delta I_1(P/P_c)$, с уменьшением частоты облучения уменьшается. Для наших планарных оловянных образцов эффект увеличения $\Delta I_1(P/P_c)$ под действием электромагнитного поля возникает при частотах ~ 100 МГц. Интересно отметить, что влияние электромагнитного поля на $\Delta I_1(P/P_c)$ так же, как и на динамическое сопротивление R_{d1} и ток отсечки ЦПФ [6], имеет порог по мощности СВЧ поля.

Некоторые трудности возникают при объяснении наличия ниспадающей ветви в зависимости $\Delta I_1(P/P_c)$, так как даже завышенные оценки перегрева пленки в наших экспериментах пренебрежимо малы (~ 10^{-3} К). Отсутствие явления перегрева в наших экспериментах видно и из вольт-амперных характеристик (см. например, [6]). Поэтому ниспадающая ветвь зависимости $\Delta I_1(P/P_c)$ не связана с перегревом образца, а является следствием внутренней природы взаимодействия ЦПФ с внешним электромагнитным полем.

Таким образом, можно утверждать, что, как в режиме стимуляции, так и в режиме подавления сверхпроводимости микроволновым полем, с увеличением мощности облучения резистивное состояние сверхпроводникового канала становится все более устойчивым к возрастанию постоянного тока, что проявлятся в удлинении линейных участков вольт-амперных характеристик, сопротивления которых кратны R_{d1}, т.е. наблюдается эффект стабилизации резистивного состояния канала электромагнитным полем. Из вышесказанного следует,

что в отсутствие внешнего электромагнитного поля джозефсоновское излучение токового ЦПФ вполне может стабилизировать резистивное состояние канала. Необходимо отметить, что для наших планарных оловянных образцов в некоторых случаях в режиме стимуляции сверхпроводимости СВЧ полем сверхпроводниковый канал при возникновении в нем первого токового ЦПФ выдерживал до образования второго ЦПФ постоянный ток почти в четыре раза больший, чем при мощности облучения равной нулю, т.е. максимум $\Delta I_1(P/P_c)\,/\Delta I_1\,(P=0) \approx 4$, при этом значение I_{c1} увеличивалось только в 1,5 раза. Это свидетельствует о довольно сильном различии влияния микроволнового поля на I_{c2} и I_{c1}.

Ранее нами было показано, что если сверхпроводящий канал подвергается воздействию внешнего высокочастотного электромагнитного поля, то начиная с некоторого уровня мощности P_c в нем возникают высокочастотные центры проскальзывания фазы (ВЧ ЦПФ) [7,8].

На рис. 2 приведены два семейства ВАХ образца Sn-3. Видно, что при высокой частоте облучения (f = 3 825 МГц) (рис. 2,*а*) состояние сверхпроводникового канала, в котором образовался ВЧ ЦПФ, более устойчиво по отношению к возрастающему постоянному току (продолжительные линейные начальные участки ВАХ). При довольно низкой частоте (f = 75 МГц) (рис. 2,*б*) состояние сверхпроводникового канала, в котором образовался ВЧ ЦПФ, крайне неустойчиво к пропусканию постоянного тока: с его увеличением ВАХ становятся нелинейными. При этом надо отметить, что сопротивление ВЧ ЦПФ R_1 для частоты f = 3 825 МГц равно 1,6 Ом, в то время как для частоты f = 75 МГц сопротивление R_1 = 1,3 Ом. Следовательно, Джоулев разогрев $I^2R_1(f)$ при частоте облучения f = 3 825 МГц даже больше, чем при частоте облучения f = = 75 МГц. Однако устойчивость резистивного состояния канала, обусловленного возникновением ВЧ ЦПФ, к возрастающему постоянному току через канал при более высокой частоте облучения больше, чем при низкой частоте, что убедительно видно из начальных участков ВАХ (см. рис. 2). Таким образом, с увеличением частоты облучения устойчивость резистивных состояний сверхпроводникового канала, обусловленных микроволновым полем, к возрастанию постоянного тока через образец только увеличивается, причем это имеет место во всем интервале мощностей существования ВЧ ЦПФ, т.е. наблюдается сохранение линейности начальных участков ВАХ с увеличением мощности облучения на данной частоте.

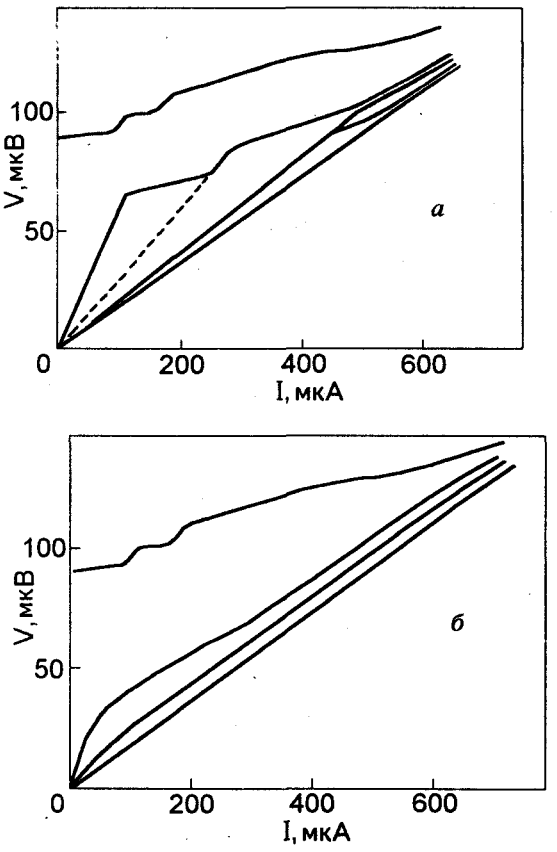

Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик сверхпроводникового канала Sn-3 при различных уровнях мощности внешнего облучения при T = 3, 762 К и f = 3 825 (*а*) и 75 МГц (*б*).

Важно также обратить внимание на следующее обстоятельство. Показано [9,10], что с увеличением частоты облучения критическая мощность растет, причем такое поведение P_c наблюдается вплоть до частот $\omega' \approx (1 - T/T_c)^{1/2}/\,1{,}2\tau_E$ (τ_E — время неупругой релаксации). При дальнейшем увеличении частоты облучения P_c практически остается постоянной. Следовательно, с увеличением частоты облучения также увеличивается и величина переменного тока, обусловливающая возникновение ВЧ ЦПФ. Однако, как уже отмечалось, устойчивость состояний сверхпроводникового канала, в котором образовались ВЧ ЦПФ, к пропусканию через них постоянного тока с увеличением частоты переменного тока не только не уменьшается, но увеличивается.

Заключение

Таким образом, из вышеизложенного очевиден тот факт, что резистивные состояния сверхпроводниковых каналов при наличии внешнего микроволнового поля становятся более устойчивыми к

пропусканию тока, чем в его отсутствие. Этот эффект наблюдается начиная с частот облучения порядка обратного времени релаксации зарядового разбаланса $f_Q = (2\pi\tau_Q)^{-1}$ (для образца Sn-3 f_Q = = 123 МГц, а для образца Sn-12 f_Q = 100 МГц). Поэтому объяснить это стимуляцией сверхпроводимости, согласно модели Элиашберга [11], не представляется возможным. Следует заметить, что для Sn-вискеров джозефсоновская частота ЦПФ $\approx$ 500 Мгц [3], что гораздо меньше нижней граничной частоты стимуляции. Однако в этом случае наблюдается сильное увеличение ΔI_i с ростом i. К настоящему времени не существует теоретического обоснования этого эффекта.

Таким образом, на основании полученных нами данных можно сделать следующие выводы.

1. Под действием электромагнитного поля, частота которого выше обратного времени релаксации зарядового разбаланса (~ 100 МГц), с увеличением мощности облучения резистивное состояние сверхпроводникового канала, обусловленное постоянным током, становится все более устойчивым к возрастанию постоянного тока через канал. С увеличением частоты облучения при равных других условиях устойчивость возрастает. Из этого следует, что джозефсоновское излучение токового ЦПФ вполне может стабилизировать сверхпроводящие свойства канала. Однако остается вопрос о конкретном механизме этого явления.

2. Под действием электромагнитного поля, частота которого выше обратного времени релаксации зарядового разбаланса (~ 100 МГц), с увеличением частоты облучения резистивное состояние сверхпроводникового канала, обусловленное внешним микроволновым полем, становится все более устойчивым к возрастанию постоянного тока через канал.

3. Обнаружено, что критические токи I_{ci} ($i = 1,2\ldots$) по-разному зависят от мощности внешнего микроволнового облучения.

1. W. J. Skocpol, M. R. Beasley, and M. Tinkham, *J. Low Temp. Phys.* **16**, 145 (1974).
2. Б. И. Ивлев, Н. Б. Копнин, *УФН* **142**, 435 (1984).
3. R. Tidecks, *Current-Induced Nonequilibrium Phenomena in Quasi-One-Dimensional Superconductors, Springer Tracts in Modern Physics* **142**, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York (1990).
4. M. Tinkham, *J. Low Temp. Phys.* **35**, 147 (1979).
5. Е. В. Безуглый, Е. Н. Братусь, В. П. Галайко, *ФНТ* **3**, 1010 (1977).
6. В. М. Дмитриев, И. В. Золочевский, Е. В. Христенко, *ФНТ* **19**, 764 (1993).
7. В. М. Дмитриев, И. В. Золочевский, В. П. Скляров, Е. В. Христенко, *ФНТ* **14**, 547 (1988).
8. V. M. Dmitriev, I. V. Zolochevskii and E. V. Khristenko, *Physica* **B173**, 389 (1991).
9. J. A. Pals and J. J. Ramekers, *Phys. Lett.* **A87**, 186 (1982).
10. Е. В. Безуглый, В. М. Дмитриев, В. Н. Светлов, Г. Е. Чурилов, А. Ю. Азовский, *ФНТ* **13**, 906 (1987).
11. Г. М. Элиашберг, *Письма в ЖЭТФ* **11**, 186 (1970).

Effect of electromagnetic field on critical currents in a superconducting channel

V. M. Dmitriev, I. V. Zolochevskii, and E. V. Khristenko

The results on the electromagnetic field effect upon the currents at which phase-slip centers appear in a superconducting channel are given. It is shown that stabilization of the resistive state of the channel due to the Josephson radiation from the phase-slip centers is possible.