

Обнаружение стимуляции сверхпроводимости внешним электромагнитным полем и высокочастотных линий проскальзывания фазы в широких оловянных пленках

А. Б. Агафонов¹, В. М. Дмитриев^{1,2}, И. В. Золочевский¹,
Е. В. Христенко¹

¹ Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина

² International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures
95 Gajowicka Str., 53-421, Wrocław, Poland
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 6 июня 2001 г.

Обнаружены стимуляция сверхпроводимости внешним электромагнитным полем и высокочастотные линии проскальзывания фазы в широких оловянных пленках. Исследованы температурные, частотные и мощностные зависимости критического тока, демонстрирующие обнаруженные явления. Показана общность этого класса неравновесных явлений для узких и широких пленок.

Виявлено стимуляцію надпровідності зовнішнім електромагнітним полем та високочастотні лінії проковзування фази в широких олов'яних плівках. Досліджено температурні, частотні та потужнісні залежності критичного струму, які демонструють відкриті явища. Показано загальність нерівноважних явищ цього класу для вузьких та широких плівок.

PACS: 74.40.+k

Исследованы тонкие ($d \sim 100$ нм), длинные ($l \sim 100$ мкм) и широкие ($w \sim 50$ мкм) оловянные пленки, напыленные на подложки из оптически полированного кристаллического кварца, обеспечивающего достаточно хороший теплоотвод от пленки олова. Технология получения пленок обеспечивала их ровные (без зазубрин) края. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) на постоянном токе снимались четырехзондовым методом. Частота внешнего облучения изменялась в пределах 0–30 ГГц, вектор электрического поля лежал в плоскости пленки вдоль направления транспортно́го тока. Образцы экранировались двойным экраном из отожженного пермаллоя.

В настоящем сообщении приведены результаты, полученные для одного из многих исследованных оловянных образцов, для остальных получены аналогичные результаты. Обнаружены следующие эффекты и особенности ВАХ.

Стимуляция сверхпроводимости

На рис. 1 представлены семейства ВАХ образца Sn-W4 ($w = 42$ мкм, $l = 92$ мкм, $d = 120$ нм, $T_c = 3,795$ К, при $T \geq T_c$ сопротивление в нормальном состоянии R_n равно 0,14 Ом) при различных уровнях мощности облучения частотой $f = 9,3$ ГГц. Для первой ВАХ мощность облучения P равна нулю, а для остальных она возрастала с увеличением порядкового номера. Начальные резистивные участки первых двух ВАХ показаны на рис. 1,б. Видно, что под воздействием облучения возрастает как критический ток начала крипа потока I_c , так и критический ток распаривания I_c^{dp} , при котором возникает первая линия проскальзывания фазы, обусловленная постоянным током (dc ЛПФ) [1].

Установлено, что с увеличением частоты облучения эффект стимуляции сверхпроводящего тока возрастает, при этом также увеличивается область

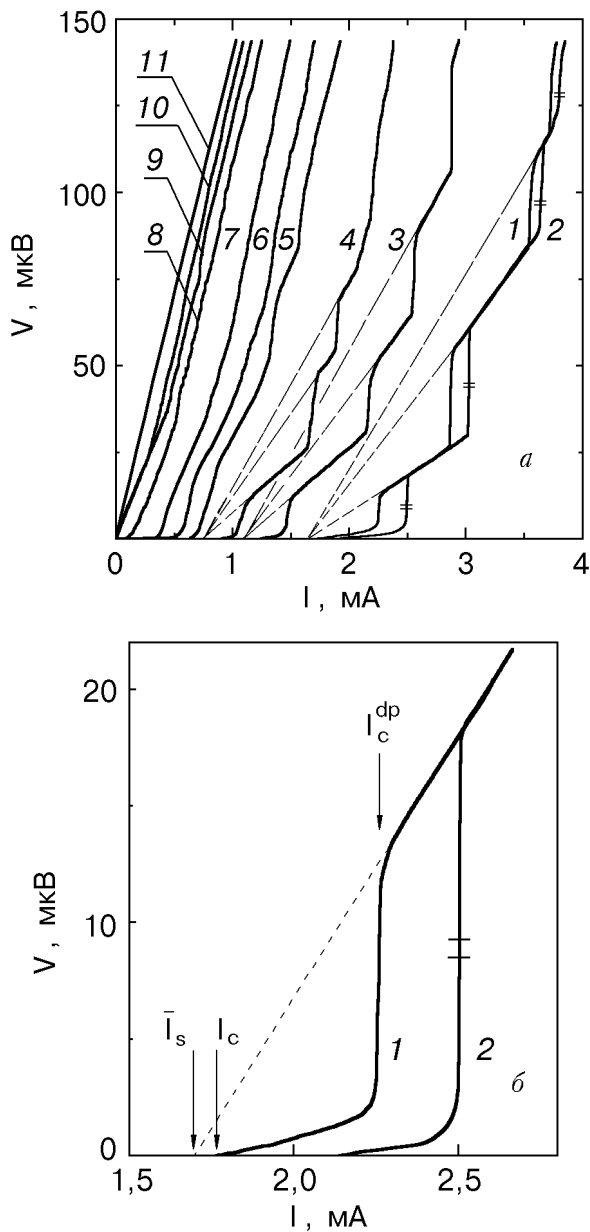


Рис. 1. Семейство ВАХ пленочного образца Sn-W4 при различных уровнях мощности внешнего облучения при $T = 3,751$ К и $f = 9,3$ ГГц (а); фрагменты ВАХ (1, 2) (б). Пересечения пунктирных прямых ВАХ 1-4 с осью токов определяют так называемые токи отсечки I_s [4].

мощностей, при которых наблюдается превышение $I_c(P)$ над $I_c(0)$ (см. рис. 2,а).

Следует также заметить, что в широких пленках с ростом частоты облучения увеличивается температурная область существования эффекта стимуляции сверхпроводимости, при этом заметна тенденция к уменьшению максимального значения относительного увеличения критического тока (см. рис. 2,б).

Известно, что микроволновое облучение широких пленок приводит к снижению краевого барьера и депиннингу вихревой решетки. Поэтому сти-

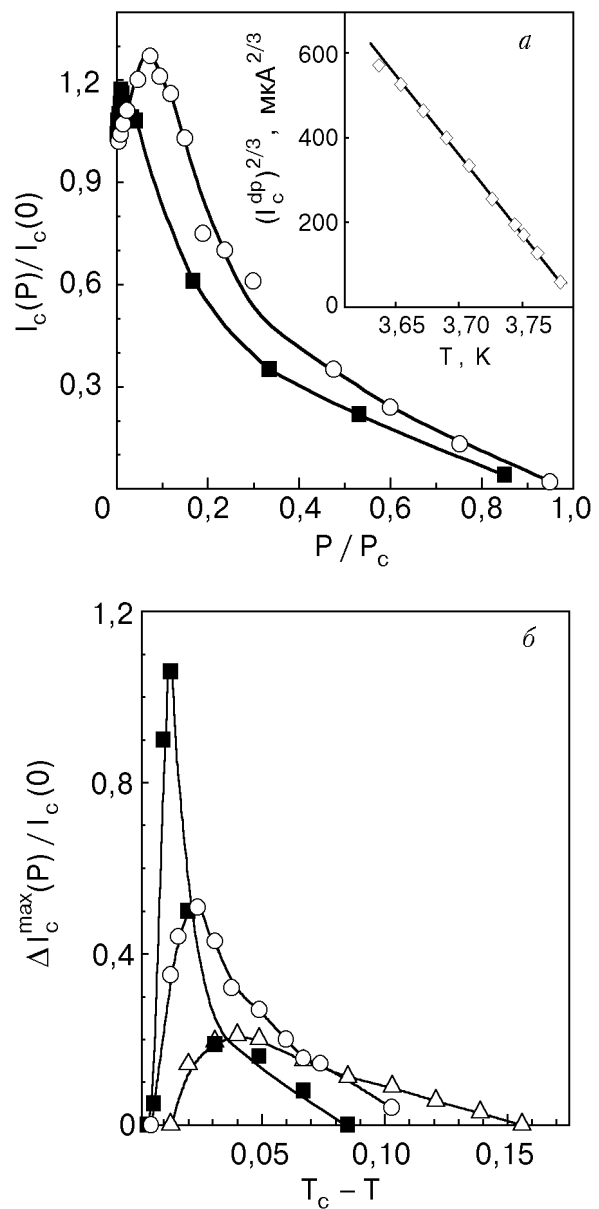


Рис. 2. Зависимости относительного увеличения критического тока $I_c(P)/I_c(0)$ от приведенной микроволновой мощности облучения P/P_c при $T = 3,744$ К (а) и максимального относительного приращения критического тока $\Delta I_c^{\max}(P)/I_c(0) = [I_c^{\max}(P) - I_c(0)]/I_c(0)$ от температуры образца Sn-W4 (б) для различных частот облучения f , ГГц: 9,3 (■), 12,9 (○), 15,2 (△) ($I_c(0)$ – критический ток пленки при $P = 0$; P_c – минимальная мощность электромагнитного излучения, при которой $I_c(P) = 0$). На вставке: зависимость тока распаривания I_c^{dp} от температуры образца.

мулирующее воздействие облучения при малых уровнях мощности может быть обусловлено только возрастанием параметра порядка, как это следует из теории [3], что приводит к повышению краевого барьера и пиннинга вихрей. Таким образом, в широких пленках, находящихся в микроволновых полях, конкурируют три механизма

воздействия облучения: стимуляция сверхпроводимости, ее подавление и депиннинг вихрей, движение которых приводит к резистивности. Сравнительный анализ результатов, полученных в настоящей работе для широких пленок, с аналогичными результатами для узких каналов [3] указывает на одни и те же закономерности явления стимуляции сверхпроводимости микроволновым полем в обоих случаях.

Линии проскальзывания фазы, обусловленные постоянным током

На рис. 1 видно, что поведение ВАХ зависит от мощности облучения. На ВАХ 1–4 видна четкая структура линейных участков с динамическими сопротивлениями $R_{dn} = nR_{d1}$ (R_{d1} — динамическое сопротивление первой dc ЛПФ), разделенных скачками напряжений, аналогичная той, которая наблюдается в узких каналах с центрами проскальзывания фазы (dc ЦПФ) [4]. Так же как и в работе [1], мы связываем эту структуру скачков на ВАХ с образованием dc ЛПФ — двумерных аналогов dc ЦПФ. Динамическое сопротивление первой dc ЛПФ, как и R_{d1} dc ЦПФ, определяется глубиной проникновения продольного электрического поля в сверхпроводник l_E и нормальным сопротивлением пленки R_n . Для образца Sn-W4 $R_{d1} = 0,023$ Ом и, следовательно, $l_E = lR_{d1}/2R_n = 7,6$ мкм. Эта величина l_E хорошо совпадает со значением l_E , полученным нами ранее для dc ЦПФ в узких оловянных каналах [4], изготовленных по такой же технологии, что и исследуемые широкие пленки.

Анализ ступенчатых ВАХ на рис. 1 приводит нас к следующим предположениям относительно механизма образования ЛПФ. При достижении транспортным током значения I_c , при котором подавляется краевой барьер, начинается вхождение собственных вихрей магнитного потока и их крип к центру пленки. Этому процессу на ВАХ соответствует область нелинейности ВАХ при $I_c < I < I_c^{dp}$. При достижении током значения тока распаривания I_c^{dp} он однородно распределяется по ширине пленки, о чем свидетельствует температурная зависимость тока распаривания (см. вставку на рис. 2,а). Это соответствует критическому состоянию пленки, которое с точки зрения распределения тока не отличается от состояния узкого канала при токе, равном критическому. На этом роль вихрей заканчивается. Именно в этот момент и происходит образование dc ЛПФ в образце. Возникает dc ЛПФ поперек об-

разца, во всех точках dc ЛПФ параметр порядка синфазно осциллирует с джозефсоновской частотой, обращаясь в некоторые моменты времени в нуль на всей линии одновременно. Поперек пленки образуется квазинормальная область, являющаяся источником неравновесных квазичастиц. Как раз такой сценарий событий, основанный на численном решении уравнений Гинзбурга–Ландау, обсуждался в работе [5]. При дальнейшем возрастании тока возникают новые ЛПФ, так же как и новые ЦПФ в узких каналах. При этом на ВАХ отсутствуют какие-нибудь признаки крипа или течения магнитного потока. Вопрос, почему образец с ЛПФ способен пропускать ток значительно больший того I_c , при котором на начальной стадии процесса начинается крип потока, остается открытым, так же как и аналогичный вопрос для системы ЦПФ: почему канал вне ЦПФ выдерживает ток больший критического.

Линии проскальзывания фазы, обусловленные переменным током

Вольт-амперные характеристики пленочного оловянного образца Sn-W4, измеренные при больших уровнях мощности облучения (рис. 1, кривые 5–11), имеют совсем другой качественный вид, чем при малых уровнях (кривые 1–4). Видно, что ВАХ 9 и 10 имеют общий начальный линейный участок и при увеличении мощности облучения уменьшается длина этого участка, а его дифференциальное сопротивление R остается неизменным. В узком канале это объясняется возникновением высокочастотных ЦПФ [4]. В широкой пленке это свидетельствует об обнаружении высокочастотных ac ЛПФ. Поскольку l_E — функция частоты, на высоких частотах $l_E(f) > l_E(0)$ [4]. Динамическое сопротивление ac ЛПФ R , так же как и на постоянном токе, зависит от $l_E(f)$. Для широкой оловянной пленки Sn-W4 сопротивление R общего линейного участка ВАХ 9 и 10 равно 0,086 Ом. На ВАХ 5–8 заметно сказывается депиннирующее воздействие СВЧ облучения, отчего заметно уменьшен крип и вид ВАХ приближается к виду, соответствующему «идеальному» течению потока. При дальнейшем увеличении мощности образец переходит в критическое состояние, но теперь уже высокочастотное. Возникает ac ЛПФ с динамическим сопротивлением R_1 , меньшим нормальному R_n (см. ВАХ 9, 10).

Авторы благодарят Т. В. Саленкову за изготовление пленок.

1. В. Г. Волоцкая, И. М. Дмитренко, Л. Е. Мусиенко, А. Г. Сиваков, *ФНТ* **7**, 383 (1981).
2. Г. М. Элиашберг, *Письма в ЖЭТФ* **11**, 186 (1970).
3. В. М. Дмитриев, Е. В. Христенко, *ФНТ* **4**, 821 (1978).
4. В. М. Дмитриев, И. В. Золочевский, Е. В. Христенко, *ФНТ* **27**, 227 (2001).
5. A. Weber and L. Kramer, *J. Low Temp. Phys.* **84**, 289 (1991).

Observation of superconductivity enhancement
by external electromagnetic field and of high
frequency phase-slip lines in wide tin films

O. B. Agafonov, V. M. Dmitriev,
I. V. Zolocheskii, and E. V. Khristenko

Enhancement of superconductivity by external electromagnetic field and high frequency phase-slip lines are observed in wide tin films. Temperature, frequency and power dependences of critical current that demonstrate the above phenomena are studied. It is shown that such nonequilibrium phenomena are common for narrow and wide films.