

# Резистивное состояние широкой сверхпроводящей пленки, обусловленное переменным электромагнитным полем

В.М. Дмитриев<sup>1,2</sup>, И.В. Золочевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua

<sup>2</sup>International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures, 95 Gajowicka Str., 53-421, Wroclaw, Poland

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2008 г.

Экспериментально показано, что при мощности внешнего микроволнового облучения больше некоторой критической  $P_c$ , по аналогии с узким каналом и высокочастотными центрами проскальзывания фазы (ас ЦПФ), в широкой сверхпроводящей пленке возникают высокочастотные линии проскальзывания фазы (ас ЛПФ). При пропускании пробного постоянного тока намного меньше критического такое состояние пленки оказывается резистивным, что проявляется в виде линейных начальных участков вольт-амперных характеристик (ВАХ), отражающих падение напряжения на ас ЛПФ. Показано, что при монотонном изменении мощности электромагнитного облучения наклон линейных участков ВАХ изменяется дискретно и кратно сопротивлению одной ас ЛПФ, возникающей при мощности равной  $P_c$ .

Експериментально показано, що при потужності зовнішнього мікрохвильового опромінення більшої деякої критичної  $P_c$ , за аналогією з вузьким каналом і високочастотними центрами проковзування фази (ас ЦПФ), у широкій надпровідній плівці виникають високочастотні лінії проковзування фази (ас ЛПФ). При пропусканні пробного постійного струму набагато меншого за критичний виявляється, що такий стан плівки є резистивним. Це проявляється у вигляді лінійних початкових ділянок вольт-амперних характеристик (ВАХ), що відображають падіння напруги на ас ЛПФ. Показано, що при монотонному змінюванні потужності електромагнітного опромінення нахил лінійних ділянок ВАХ змінюється дискретно й кратно опорі одної ас ЛПФ, що виникає при потужності рівній  $P_c$ .

PACS: 74.25.Fy Транспортные свойства (электро- и теплопроводность, термоэлектрические эффекты и т.д.);  
74.25.Nf Отклик на воздействие электромагнитных полей;  
74.40+k Флуктуации (шумы, хаос, неравновесная сверхпроводимость, локализация и т.д.).

Ключевые слова: широкая сверхпроводящая пленка, ас линия проскальзывания фазы.

## Введение

В работах [1,2] теоретически показано, что под действием электромагнитного поля однородное состояние сверхпроводника может стать неустойчивым и возможен переход к пространственно неоднородному состоянию, структура которого, однако, оставалась невыясненной.

В работе [3] экспериментально обнаружено, что под действием электромагнитного излучения с мощ-

ностью, больше критической  $P_c$ , в сверхпроводящем канале возникает динамическое фазовое расслоение на квазинормальные и квазисверхпроводящие области, физическая природа которых определенное время оставалась невыясненной. В этой связи необходимо отметить также результаты экспериментальных работ, в которых наблюдались ступенчатые структуры на кривой  $R(T)$  перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное оловянной [4] и алюминиевой [5] узких пленок, находящихся в поле СВЧ излучения.

Детальное исследование резистивного состояния сверхпроводящего канала в микроволновом поле [6–10] позволило определить природу этого состояния — образование высокочастотных центров проскальзывания фазы (ас ЦПФ).

Исследование резистивного состояния широких пленок, находящихся в электромагнитном поле, началось еще в 80-х годах прошлого столетия. Вначале экспериментально наблюдались переходы в резистивное состояние широких сверхпроводящих пленок олова [11] и алюминия [12] под действием электромагнитного облучения в магнитном поле. Геометрические размеры исследованных пленок (ширина, длина) в этих работах не приводились, и характер резистивных переходов не был определен. Работы, посвященные экспериментальному исследованию фазового расслоения в сверхпроводящих каналах под действием микроволнового поля, послужили стимулом в поисках аналогичного явления в широких пленках. В работе [13] наблюдался резистивный переход в алюминиевых пленках шириной  $w = 100$  мкм ( $w \gg \xi$ ,  $w \approx \lambda_{\perp}$ ) и длиной  $L = 5$  мм, который авторы связывали с возникновением процессов проскальзывания фазы под действием микроволнового поля ( $f = 45$  ГГц). При такой интерпретации резистивного состояния должны наблюдаться скачки на зависимости сопротивления пленки от микроволновой мощности. Однако ничего подобного авторы не наблюдали. Очевидно, это связано с большой длиной пленки (относительный размер ЦПФ  $2l_E/L$  очень мал). В работе [14], которая появилась гораздо позже, было показано, что пленки, ширина которых  $w < 4\lambda_{\perp}$ , являются узкими каналами. Поэтому, строго говоря, пленки, исследованные в [13], являлись узкими каналами, резистивность которых обусловлена возникновением ас ЦПФ.

В работе [15] была сделана попытка исследования линий проскальзывания фазы (ЛПФ) в широких пленках при облучении их высокочастотной мощностью с частотой 30 ГГц. Исследовались оловянные пленки шириной  $w = 70$  мкм, толщиной 100 нм и длиной  $L = 2$  мм, напыленные на кремниевые подложки. Для теплового согласования оловянной пленки с подложкой кремний — далеко не самый подходящий материал (гораздо лучше, в этом конкретном случае, была бы подложка из кристаллического кварца [16]). С этими пленками были произведены следующие манипуляции [17]: формирование канала шириной  $w \approx 1$  мкм и глубиной примерно 20 нм поперек пленки с помощью электронно-лучевой литографии и ионно-лучевого травления, боковые границы пленки были промодулированы с амплитудой и периодом в несколько микрон. Это, по утверждению авторов, было сделано «для облегчения вхождения вихрей потока», хотя «без канала ЛПФ тоже наблюдались, но были хуже выраже-

ны» [17]. Мы утверждаем, что такие манипуляции с пленкой совместно с плохим теплоотводом приводят к возникновению в пленке не ЛПФ, а «горячих пятен», физика которых совершенно отлична от физики ЛПФ. О возникновении «горячих пятен» в пленках авторов работ [15,17], а не ЛПФ, свидетельствуют следующие обстоятельства.

1. Тепловое согласование исследуемых образцов с подложкой было плохим [16]. Это явилось причиной, на наш взгляд, немоного характера температурной зависимости сопротивления теплового домена (а не ЛПФ): с понижением температуры это сопротивление сначала уменьшалось, а затем увеличивалось [17].

2. Известно, что глубина проникновения продольного электрического поля в сверхпроводник  $l_E(f)$ , которая определяет размер высокочастотных ЦПФ и ЛПФ, является функцией частоты внешнего электромагнитного поля [7,9]. Эксперименты в работе [15] проводились при частоте облучения  $f = 30$  ГГц. В этом случае  $l_E(f = 30 \text{ ГГц}) \gg l_E(f = 0)$  [6,7]. Следовательно, при частоте облучения равной 30 ГГц сопротивление дс ЛПФ  $R_{d1}(f = 0)$ , обусловленного протеканием постоянного тока, должно быть гораздо меньше сопротивления ас ЛПФ  $R_1(f = 30 \text{ ГГц})$ , обусловленного протеканием высокочастотного тока. Однако в работе [15]  $R_{d1}(f = 0) = R_1(f = 30 \text{ ГГц})$ , т.е. под действием микроволнового поля частотой 30 ГГц глубина проникновения продольного электрического поля не меняется. Такое поведение  $l_E$  оправдывает предположение о возникновении «горячих пятен», а не ас ЛПФ.

Необходимо отметить и тот факт, что авторами работы [15] неудачно выбрана длина пленки: она слишком велика. Это привело к тому, что возникали трудности при определении размера ЛПФ, так как в такой пленке могут возникнуть приблизительно 100 ЛПФ. Таким образом, вопрос о высокочастотных ЛПФ в широких пленках оставался открытым.

Используя оригинальную технологию, описанную в [14], нам удалось получить широкие пленки высокого качества с хорошим тепловым согласованием с подложкой. Значения критических токов этих пленок [14] соответствовали предсказаниям теории. На этих пленках нами впервые наблюдались высокочастотные ЛПФ [18]. Однако эта работа была посвящена обнаружению эффекта стимуляции сверхпроводимости в широких пленках, и формат письма редактору не позволил более детально представить материалы исследований ас ЛПФ. В настоящей работе мы восполняем этот пробел.

Параметры исследуемых образцов приведены в табл. 1. На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов SnW14 рис. 1,а и SnW10 рис. 1,б, измеренные при различных уровнях мощности облучения на частотах  $f = 2473$  МГц (рис. 1,а) и  $f =$

Таблица 1. Параметры пленочных образцов

Образец	$L$ , мкм	$w$ , мкм	$d$ , нм	$R_{4,2}$ , Ом	$R_{\square}$ , Ом	$T_c$ , К	$l_i$ , нм	$R_{300}$ , Ом
SnW10	88	7	181	0,487	0,040	3,809	169	9,156
SnW14	90	18	292	0,098	0,020	3,815	215	2,33

Примечание:  $L$  — длина;  $w$  — ширина;  $d$  — толщина образца;  $l_i$  — длина свободного пробега электрона.

= 1000 МГц (рис. 1, б). Для первой ВАХ мощность облучения равна нулю, а для ВАХ 2 и ВАХ 3 мощность микроволнового облучения  $P$  больше критической  $P_c$ , причем  $P_3 > P_2 > P_c$ . На вставке рис. 1, б приведены эти же ВАХ в более крупном масштабе, чтобы продемонстрировать вихревой участок ВАХ 1. На рис. 1 видно, что под действием микроволнового облучения  $P > P_c$  в сверхпроводящей пленке возникают ЛПФ, вызван-

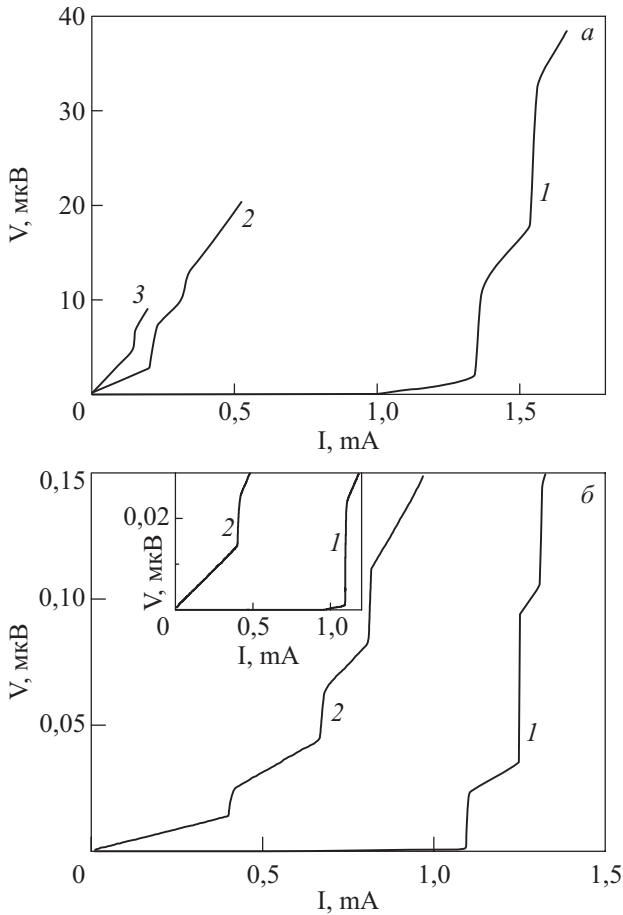


Рис. 1. ВАХ сверхпроводящих широких пленок при различных уровнях мощности облучения. Образец SnW14:  $f = 2473$  МГц,  $T = 3,7845$  К,  $R_{d1} = 0,031$  Ом,  $R_1 = 0,015$  Ом (а). Образец SnW10:  $f = 1000$  МГц,  $T = 3,758$  К,  $R_{d1} = 0,079$  Ом,  $R_1 = 0,035$  Ом (б). Для ВАХ 1 мощность облучения  $P_1 = 0$ ,  $P_c < P_2 < P_3$ .

ные электромагнитным облучением (ас ЛПФ), в отличие от ЛПФ, вызванных постоянным током (дс ЛПФ).

При мощности облучения  $P = P_c$  в пленке появляется первый ас ЛПФ (см. рис. 1, начальный участок ВАХ 2). При увеличении мощности облучения количество ЛПФ, возникающих под действием электромагнитного поля, растет (см. рис. 1, б, начальный участок ВАХ 3), при этом сопротивление образца увеличивается кратным образом:  $R_n = nR_1$ , где  $R_1$  — сопротивление одного ас ЛПФ,  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  ( $N$  — наибольшее число ас ЛПФ для данной частоты облучения и для данного образца). Поскольку размеры исследуемых образцов малы по сравнению с длиной волны электромагнитного поля ( $L \sim 10^{-4}$  м, а минимальная длина волны примерно  $10^{-2}$  м), можно считать, что через образец протекает однородный по длине пленки высокочастотный ток  $I_f \sim \sqrt{P}$ , хотя его величина непосредственно и не измерялась. Как видно на рис. 1, с увеличением мощности облучения  $P > P_c$  (величины высокочастотного тока через образец) сопротивление каждой ас ЛПФ остается постоянным. При пропускании постоянного тока через ас ЛПФ ее сопротивление не изменяется, т.е. наблюдается устойчивость ас ЛПФ к пропусканию через нее постоянного тока. Эти факты отрицают наличие разогревного эффекта, а также предположение о возможности возникновения вихрей.

Обратим внимание на ВАХ 2. Видно, что в широкой пленке под действием микроволнового поля ( $P = P_c$ ) образовалась первая ас ЛПФ (см. начальный линейный участок ВАХ). Если при  $P = P_c = \text{const}$  через пленку пропускать постоянный ток, то в ней будут в дополнение к ас ЛПФ возникать дс ЛПФ. При этом важно отметить, что сопротивление ЛПФ, обусловленной протеканием постоянного тока, равно сопротивлению ЛПФ, вызванного микроволновым полем:  $R_{d1}(P = P_c) = R_1(f)$ . Заметим, что сопротивление дс ЛПФ при  $P \geq P_c$  в общем случае не равно сопротивлению дс ЛПФ в ее отсутствие. При увеличении мощности облучения в пленке возникают дополнительные ас ЛПФ. Если при этом через пленку пропускать постоянный ток, то при возникновении дс ЛПФ их сопротивление остается прежним:  $R_{d1}(P \geq P_c) = R_1(f)$ .

Таким образом, приведенные в настоящей работе результаты исследований говорят о том, что в отсутствие постоянного тока при мощности облучения больше критической сопротивление сверхпроводящей широкой пленки изменяется дискретно и кратно величине сопротивления  $R_1(f)$  ас ЛПФ. С увеличением мощности облучения или постоянного тока сопротивление  $R_1(f)$  остается постоянным.

При  $P \geq P_c$  сопротивление ас ЛПФ равно сопротивлению дс ЛПФ.

Полученные в настоящей работе результаты на широких пленках аналогичны полученным ранее на узких каналах, что указывает на идентичность процессов проскальзывания фазы в этих двух объектах исследований.

1. Б.И. Ивлев, *ЖЭТФ* **72**, 1197 (1977).
2. Е.В. Гинзбург, Б.З. Спивак, *ЖЭТФ* **80**, 2013 (1980).
3. В.М. Дмитриев, Е.В. Христенко, *Письма в ЖЭТФ* **29**, 758 (1979).
4. Ю.И. Латышев, Ф.Я. Надь, *Письма в ЖЭТФ* **26**, 488 (1977).
5. Yu.I. Latyshev and F.Ya. Nad', *J. de Phys.* **39**, C6-531 (1978).
6. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, *ФНТ* **10**, 777 (1984) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **10**, 409 (1984)].
7. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, *ФНТ* **12**, 540 (1986) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **12**, 305 (1986)].
8. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, *ФНТ* **12**, 643 (1986) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **12**, 365 (1986)].
9. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, *ФНТ* **14**, 134 (1988) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **14**, 73 (1988)].
10. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, В.П. Склярков, Е.В. Христенко, *ФНТ* **14**, 547 (1988) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **14**, 302 (1988)].
11. С.К. Толпыго, В.А. Тулин, *Письма в ЖЭТФ* **28**, 686 (1978).
12. С.К. Толпыго, В.А. Тулин, *ЖЭТФ* **78**, 2352 (1980).
13. P.J.M. Ventum, J.W. Gerritsen, and P. Wyder, *Solid State Commun.* **56**, 943 (1985).
14. В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Т.В. Саленкова, Е.В. Христенко, *ФНТ* **31**, 169 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 127 (2005)].
15. В.И. Кузнецов, В.А. Тулин, *Письма в ЖЭТФ* **61**, 992 (1995).
16. S.V. Kaplan, *J. Low Temp. Phys.* **37**, 343 (1979).
17. Е.В. Ильичев, В.И. Кузнецов, В.А. Тулин, *Письма в ЖЭТФ* **56**, 297 (1992).
18. А.Б. Агафонов, В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, *ФНТ* **27**, 928 (2001) [*Low Temp. Phys.* **27**, 686 (2001)].

## The resistive state of a wide superconducting film caused by ac electromagnetic field

V.M. Dmitriev and I.V. Zolochevskii

It is shown experimentally that for an external microwave irradiation power higher than some critical  $P_c$  a wide superconducting film exhibits high-frequency phase-slip lines (ac PSL) by analogy with a narrow channel and ac PSC. On passing a probe direct current lower than the critical one, the film state appears to be resistive, showing itself as linear initial portions in the  $I$ - $V$  curves that present voltage drop across ac PSL. It is found that as the electromagnetic irradiation power is changed monotonously, the IVC linear portion slopes display variations that are discrete and multiple to the resistance of a single ac PSL appearing at  $P = P_c$ .

PACS: 74.25.Fy Transport properties (electric and thermal conductivity, thermoelectric effects, etc.);  
 74.25.Nf Response to electromagnetic fields (nuclear magnetic resonance, surface impedance, etc.);  
 74.40+k Fluctuations (noise, chaos, nonequilibrium superconductivity, localization, etc.).

Keywords: wide superconducting film, ac phase-slip lines.