

05.4;12

О тепловом механизме микроволнового пробоя высокотемпературных сверхпроводящих пленок

© А.А. Пухов

Объединенный институт высоких температур. Научно-исследовательский центр прикладных проблем электродинамики РАН, Москва

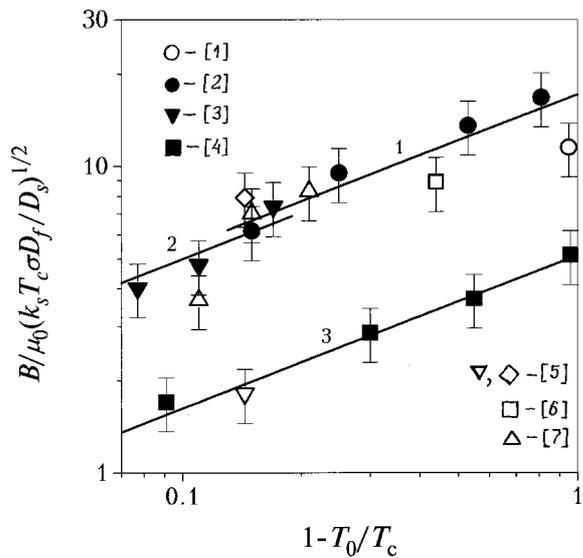
Поступило в Редакцию 25 сентября 1997 г.

Теоретические аргументы, свидетельствующие о тепловой природе микроволнового пробоя высокотемпературных сверхпроводящих пленок, сравниваются с экспериментальными данными. Сравнение порогового поля пробоя однородной пленки B_f и порогового поля пробоя на несверхпроводящих дефектах B_d с результатами экспериментов подтверждает зависимость $B_f, B_d \propto (T_c - T_0)^{1/2}$, соответствующую тепловому механизму. Показано, что пространственно-временная картина наблюдаемого пробоя, по-видимому, связана с перегревом пленки вблизи дефектов размера $10^{-5} \div 10^{-6}$ м. Дальнейшее увеличение амплитуды поля пробоя может быть ограничено резким уменьшением энергии критических возмущений, инициирующих пробой.

Микроволновой пробой высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленок наблюдается при достаточно больших величинах поверхностного микроволнового поля $B \sim 10$ мТ [1–7], соответствующих интенсивности падающего микроволнового излучения $P = B^2/2\varepsilon_0^{1/2}\mu_0^{3/2} \sim 10^{10}$ Вт · м⁻². При этом нормальное состояние возникает либо локально (в виде температурных доменов) [7–9], либо охватывает значительный участок пленки [10,11]. Тепловой механизм пробоя, обсуждавшийся еще для низкотемпературных сверхпроводников [12,13], связан с резким увеличением коэффициента поглощения пленки выше критической температуры T_c [14,15]. В [16,17] было получено выражение для порогового поля пробоя однородной пленки:

$$B_f = \mu_0 [k_s(T_c - T_0)\sigma D_f/D_s]^{1/2}, \quad (1)$$

где k_s и D_s — теплопроводность и толщина подложки, обратная сторона которой стабилизирована по температуре T_0 , σ — проводи-



Сравнение экспериментальных данных [1–7] с теоретической зависимостью (1). Кривые 1, 2 и 3 соответствуют аппроксимации $B \propto (T_c - T_0)^{1/2}$ измерений [2], [3] и [4] соответственно. Вертикальные линии отражают погрешность измерений и неопределенность значений электрофизических параметров образцов.

мость пленки толщиной D_f в нормальном состоянии. Пространственно-временная картина разрушения сверхпроводимости при $B > B_f$ связана с возможностью неограниченного расширения области нормальной фазы [18], возникшей в пленке под действием достаточно сильных возмущений [19].

На рисунке представлено сравнение формулы (1) с экспериментальными данными [1–7]. Измерения проводились на пленках с различными T_c (YBCO, ТВССО), расположенных на различных подложках (LaAlO₃, MgO), и при значениях T_0 , изменяющихся в широком диапазоне 4.2 ÷ 100 К. Из рисунка видно, что теоретическое выражение (1) правильно описывает температурную зависимость поля пробоя, что в свою очередь явно указывает на тепловую природу пробоя. Однако экспериментально наблюдаемые амплитуды поля пробоя выше предсказываемых выражением (1). Из рисунка видно, что коэффициент

пропорциональности в соотношении $B \propto (T_c - T_0)^{1/2}$ существенно отличается для различных образцов и может на порядок превышать значение, предсказываемое формулой (1). Это обстоятельство (отсутствие универсального поведения коэффициента пропорциональности) может быть связано с влиянием локальных эффектов на порог пробоя.

В [21] показано, что присутствие в ВТСП пленке нормальных (несверхпроводящих) дефектов может приводить к увеличению пороговой интенсивности пробоя до $B_d > B_f$. Разрушение сверхпроводимости в пленке в этом случае связано с локальным перегревом пленки вблизи дефекта, что в ряде случаев может приводить к возникновению локализованного на дефекте температура домена [21]. Нормальный дефект представляет собой область пленки, коэффициент поглощения которой k_d не имеет резкой зависимости от температуры и может существенно отличаться от коэффициента поглощения остальной пленки $\kappa_f = 4(R_0\sigma D_f)^{-1}/[2D(R_0\sigma D_f)^{-1} + 1]^2$ в нормальном состоянии. Здесь $R_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 377 \Omega$ — волновое сопротивление вакуума. Дефектом может быть область пленки с пониженными критическими или электрофизическими параметрами, роль которой в реальных ВТСП пленках могут играть границы кристаллитов, области флуктуации стехиометрии, вариация толщины пленок и т.д.

Величина порогового поля пробоя на нормальном дефекте B_d сложным образом зависит от размера дефекта и отношения коэффициентов поглощения дефекта и пленки $\gamma = \kappa_d/\kappa_f$ [21]. Кроме того, можно показать, что существенное влияние на величину B_d оказывает форма дефекта (размерный эффект). Удобно рассматривать предельные случаи круглого (радиуса R_d) и линейного (полуширины D_d) дефектов. Для дефектов малых размеров $R_d, D_d \ll D_s$ можно получить простые приближенные выражения для B_d в случае круглого

$$B_d/B_f = \sqrt{(\pi/4)(\gamma R_d/D_s)^{-1}} \quad (2)$$

и линейного

$$B_d/B_f = \sqrt{(\pi/4)[\gamma |\ln(D_d/D_s)| D_d/D_s]^{-1}} \quad (3)$$

дефектов. Из выражений (2), (3) видно, что B_d подчиняется той же температурной зависимости, что и B_f . Сравнение (2), (3) с экспериментальными данными показывает, что представление о перегреве пленки микроволновым излучением вблизи дефектов размера R_d ,

$D_d \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ м с $\gamma \sim 1$ позволяет удовлетворительно описать результаты измерений.

Из формул (2), (3) следует, что с уменьшением размера дефекта R_d , $D_d \rightarrow 0$ величина B_d возрастает. Однако анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что измеряемая величина поля пробоя не достигает чрезмерно больших величин и никогда не превышает десятков мТ. С другой стороны, поскольку спектр размеров дефектов реальных пленок ограничен сверху, то пробой происходит на самом крупном дефекте данной области пленки размера $D^* = \max(R_d, D_d)$ при минимальном пороговом поле $B^* = B_d(D^*)$. Таким образом, совершенствование качества пленки ($D^* \rightarrow 0$), в соответствии с (2), (3), должно приводить к существенному возрастанию поля пробоя B^* , что не наблюдается в экспериментах. Отмеченное ограничение может быть объяснено, исходя из следующих соображений. В соответствии с тепловым механизмом B_f является нижней границей возможных значений поля пробоя. Величина B_d характеризует возможное превышение этой границы, зависящее от размера дефекта. Пробой однородной пленки имеет пороговый характер по энергии возмущений, иницирующих область нормальной фазы, размер которой достаточен для распространения на всю пленку. Величина критической энергии таких возмущений $E_c(B)$ быстро спадает с ростом поверхностного микроволнового поля $E_c(B) \propto B^{-6}$ [19]. Например, для типичных значений параметров системы пленка-подложка [19] при полях $B \sim 1$ мТ критическая энергия $E_c \sim 5 \cdot 10^{-3}$ Дж, тогда как при полях $B \sim 1$ мТ критическая энергия $E_c \sim 5 \cdot 10^{-9}$ Дж. Таким образом, даже наличие в пленке только малых дефектов не приводит к пробоям за счет перегрева вблизи таких дефектов. При соответствующих им высоких значениях полей $B \sim B^*$ внешние возмущения, всегда присутствующие в системе, имеют чрезвычайно низкую критическую энергию $E_c(B)$. Очевидно, что гораздо раньше перегрева вблизи столь малых дефектов пробой наступит вследствие разрушения сверхпроводимости однородных областей пленки внешними возмущениями.

Таким образом, в зависимости от соотношения между уровнем энергии возмущений E , действующих в системе, и величиной микроволнового поля B доминирует один из двух возможных сценариев разрушения сверхпроводимости пленки. Ниже порогового поля однородной пленки B_f пробой принципиально невозможен. При $B^* < B^{**}$, где B^{**} определяется соотношением $E_c(B^{**}) = E$, пробой происходит вслед-

ствии перегрева пленки вблизи дефектов, а при $B^{**} < B^*$ разрушение сверхпроводимости происходит за счет инициации в пленке областей нормальной фазы внешними возмущениями.

Автор признателен А.А. Жарову и А.Н. Резнику за предоставленную возможность ознакомиться с работой [21] до ее публикации и Н.А. Бузникову за полезные обсуждения полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке ГНТП "Актуальные направления в физике конденсированных сред" (проект № 96083) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-18949).

Список литературы

- [1] *Rashton R.W.* // *Supercond. Sci. Technol.* 1991. V. 4. N 6. P. 386–392.
- [2] *Holstein W.L., Parisi L.A., Shen Z.-Y.* et al. // *J. Supercond.* 1993. V. 6. N 3. P. 191–200.
- [3] *Diete W., Aschermann B., Chaloupka H.* et al. // *Applied Superconductivity.* 1995. (Proc. EUCAS'95). UK, Bristol: IOP. 1995. V. 2. P. 1107–1110.
- [4] *Manzel M., Huber S., Bruchlos H.* et al. // *Applied Superconductivity.* 1995 (Proc. EUCAS'95). UK, Bristol: IOP. 1995. V. 2. P. 1155–1158.
- [5] *Hensen S., Lenkens M., Getta M.* et al. // *Applied Superconductivity.* 1995 (Proc. EUCAS'95). UK, Bristol: IOP. 1995. V. 2. P. 1127–1130.
- [6] *Klein N., Tellmann N., Dähne U.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1995. V. 5. N 2. P. 2663–2666.
- [7] *Diete W., Getta M., Hein M.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. P. 1236–1239.
- [8] *Hampel G., Kolodner P., Gammel P.L.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. N 4. P. 571–573.
- [9] *Hein M., Diete W., Getta M.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. N 2. P. 1264–1267.
- [10] *Wosik J., Xie L.M., Miller J.H.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. N 2. P. 1470–1473.
- [11] *Wosik J., Xie L.M., Li D.* et al. // *Czech. J. Phys.* 1996. V. 46. Suppl. S2. P. 1133–1134.
- [12] *Padamsee H.* // *IEEE Trans. Magn.* 1983. V. 19. N 3. P. 1322–1325.
- [13] *Halbritter J.* // *Proc. 1972. Appl. Supercond. Conf. USA, New York: IEEE.* 1972. P. 662–666.
- [14] *Жаров А.А., Коротков А.Л., Резник А.Н.* // *СФХТ.* 1992. Т. 5. № 3. С. 419–422.

- [15] *Zharov A.A., Korotkov A.L., Reznik A.N.* // Supercond. Sci. Technol. 1992. V. 5. N 2. P. 104–106.
- [16] *Пухов А.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 12. С. 55–59.
- [17] *Rukhov A.A.* // Supercond. Sci. Technol. 1997. V. 10. N 2. P. 82–84.
- [18] *Бузников Н.А., Пухов А.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 12. С. 45–49.
- [19] *Бузников Н.А., Пухов А.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 20. С. 51–55.
- [20] *Viznikov N.A., Rukhov A.A.* // Supercond. Sci. Technol. 1997. V. 10. N 5. P. 318–324.
- [21] *Жаров А.А., Резник А.Н.* // ЖТФ. 1998. Т. 68.