

05.4;11

Особенности микроволнового пробоя высокотемпературной сверхпроводящей пленки на дефектах

© Н.А. Бузников, А.А. Пухов

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

Поступило в Редакцию 9 июля 1997 г.

В окончательной редакции 3 февраля 1998 г.

Теоретически исследовано влияние несверхпроводящих дефектов на плотность мощности микроволнового пробоя высокотемпературной сверхпроводящей пленки. Установлено, что сценарий разрушения сверхпроводимости существенно зависит от формы дефекта, а также от отношения коэффициентов поглощения дефекта и пленки. Показано, что плотность мощности пробоя на дефекте может быть как больше, так и равна пороговой плотности мощности пробоя однородной пленки.

Микроволновой пробой высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленок наблюдался в целом ряде работ [1–5]. Тепловой механизм пробоя связан с резким увеличением коэффициента поглощения пленки κ при превышении критической температуры T_c [6]. В [7] было показано, что присутствие в ВТСП пленке нормальных (несверхпроводящих) дефектов существенно влияет на величину плотности мощности пробоя ВТСП пленки P_c . Разрушение сверхпроводимости в этом случае может быть связано с возникновением локализованного на дефекте температурного домена. В настоящей работе исследовано влияние формы дефекта и его коэффициента поглощения на сценарий разрушения сверхпроводимости и плотность мощности микроволнового пробоя.

Рассмотрим ВТСП пленку толщиной D_f , расположенную на диэлектрической подложке толщиной $D_s \gg D_f$, обратная сторона которой стабилизирована по температуре T_0 . Падающее микроволновое излучение плотности мощности P частично поглощается в пленке, имеющей

нормальный дефект произвольной формы. Коэффициент поглощения излучения дефектом $\kappa = \kappa_d$ не зависит от температуры T , а коэффициент поглощения остальной пленки $\kappa = \kappa_f$ в микроволновом диапазоне можно представить в виде $\kappa_f = \kappa_n \eta(T - T_c)$ [8], где $\kappa_n = 4(\sigma D_f Z_0)^{-1} / [2(\sigma D_f Z_0)^{-1} + 1]^2$ и σ — коэффициент поглощения и проводимость пленки в нормальном состоянии, $Z_0 = 377 \Omega$ — волновой импеданс вакуума, $\eta(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда.

Поглощение дефектом микроволнового излучения приводит к увеличению его температуры. Вследствие диффузии тепла происходит разогрев пленки и подложки и прилегающая к дефекту область пленки может перейти в нормальное состояние и стать источником дополнительного поглощения излучения. В результате в пленке и подложке устанавливается стационарное распределение температуры, соответствующее локализованному на дефекте температурному домену [7]. При этом распределение температуры в подложке описывается трехмерным стационарным уравнением теплопроводности

$$\nabla(k_s \nabla T) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями [9]

$$k_s \frac{\partial T}{\partial n} = -\kappa P, \quad T = T_0 \quad (2)$$

на границе пленки и подложки и на обратной стороне подложки соответственно. Здесь k_s — теплопроводность подложки, n — нормаль к пленке, направленная внутрь подложки. Задача (1), (2) может быть решена методом разделения переменных [9,10] в предельных случаях линейного и круглого дефектов.

Рассмотрим сначала линейный дефект полушириной D_d . Пренебрегая для простоты зависимостью k_s от температуры, для полуширины домена D получаем

$$\sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k^{-2} \exp(-2\lambda_k D / D_s) - 2(\gamma - 1) \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k^{-2} \operatorname{sh}(\lambda_k D_d / D_s) \times \exp(-\lambda_k D / D_s) = (P - P_p) / 2P. \quad (3)$$

Здесь $\lambda_k = \pi(2k + 1) / 2$, $\gamma = \kappa_d / \kappa_n$ — отношение коэффициентов поглощения дефекта и пленки в нормальном состоянии,

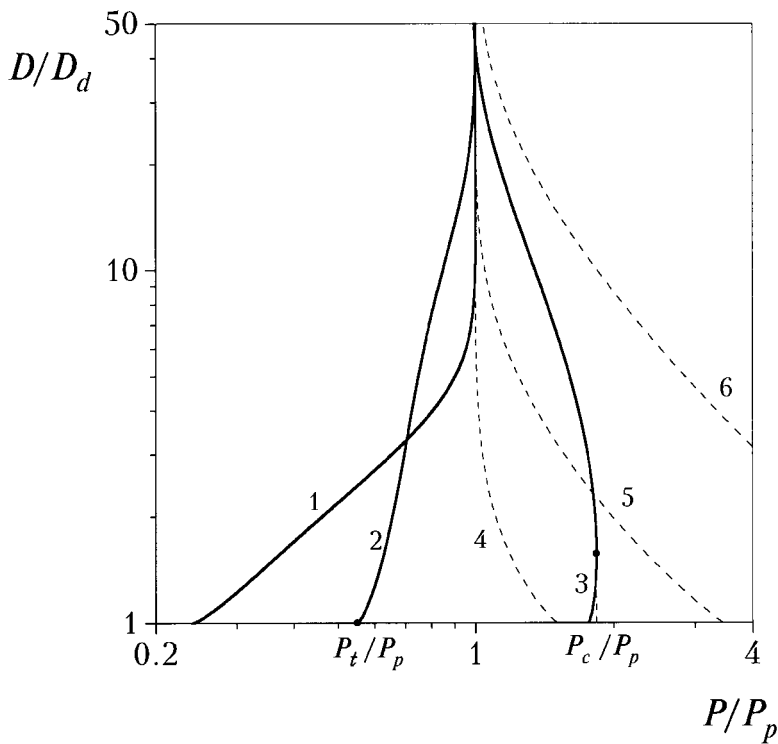


Рис. 1. Линейный дефект. Зависимость полуширины домена D от плотности мощности излучения P : сплошные линии — $\gamma = 5$, пунктирные линии — $\gamma = 0.8$. 1, 4 — $D_d/D_s = 0.5$; 2, 5 — $D_d/D_s = 0.1$; 3, 6 — $D_d/D_s = 0.02$.

$P_p = 2k_s(T_c - T_0)/\kappa_n D_s$ — пороговая плотность мощности пробоя однородной пленки [8]. При $P < P_p$ пробой принципиально невозможен [8], а при $P > P_p$ пробой развивается, если в пленке возникает область нормальной фазы достаточно большого размера [9,10]. На рис. 1 показаны зависимости $D(P)$ при различных значениях D_d для случаев $\gamma < 1$ (пунктирные линии) и $\gamma > 1$ (сплошные линии).

При $\gamma > 1$ локализованный на дефекте температурный домен возникает, когда плотность мощности падающего излучения P превышает

пороговое значение P_t , определяемое из условия $D(P_t) = D_d$. При достаточно большой величине D_d с увеличением P полуширина домена возрастает (кривые 1, 2 на рис. 1), и микроволновый пробой происходит при $P = P_p$, когда домен заполняет всю пленку ($D \rightarrow \infty$). При меньших D_d домен исчезает при плотности мощности пробоя $P_c > P_p$ (кривая 3 на рис. 1). В этом случае переход пленки в нормальное состояние происходит вследствие распространения по ней области нормальной фазы, возникшей на дефекте [8,10]. При $\gamma < 1$ в пленке не возникает домена (кривые 4–6 на рис. 1), а пробой происходит при плотности мощности P_c , определяемой из условия $D(P_c) = D_d$. В этом случае величина P_c всегда больше пороговой плотности мощности пробоя однородной пленки P_p . Для дефекта малой полуширины $D_d \ll D_s$ плотность мощности пробоя P_c приближенно описывается соотношениями

$$P_c/P_p = (\pi/4) \left[\gamma |\ln(D_d/D_s)| D_d/D_s \right]^{-1}, \quad \gamma < 1,$$

$$P_c/P_p = (\pi/8) \left[(\gamma - 1) |\ln\{(\gamma - 1)D_d/D_s\}| D_d/D_s \right]^{-1}, \quad \gamma > 1. \quad (4)$$

Рассмотрим теперь круглый дефект радиуса R_d . Для радиуса домена R из уравнений (1), (2) имеем

$$\begin{aligned} (R/D_s) \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k^{-1} I_1(\lambda_k R/D_s) K_0(\lambda_k R/D_s) \\ + (R_d/D_s)(\gamma - 1) \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k^{-1} I_1(\lambda_k R_d/D_s) K_0(\lambda_k R/D_s) = P_p/4P, \end{aligned} \quad (5)$$

где $I_1(x)$ и $K_0(x)$ — модифицированные функции Бесселя. Отметим, что зависимость, аналогичная (5), была получена в [7]. На рис. 2 показаны зависимости $R(P)$ при различных значениях R_d для случаев $\gamma < 1$ (пунктирные линии) и $\gamma > 1$ (сплошные линии).

Из рис. 2 видно, что при $\gamma < 1$ зависимость $R(P)$ качественно подобна зависимости $D(P)$ для линейного дефекта, и микроволновой пробой происходит без образования температурного домена в пленке (кривые 4–6 на рис. 2). При $\gamma > 1$ в пленке образуется домен, радиус которого монотонно возрастает с увеличением P вплоть до плотности мощности пробоя P_c (кривые 1–3 на рис. 2). Отметим, что в

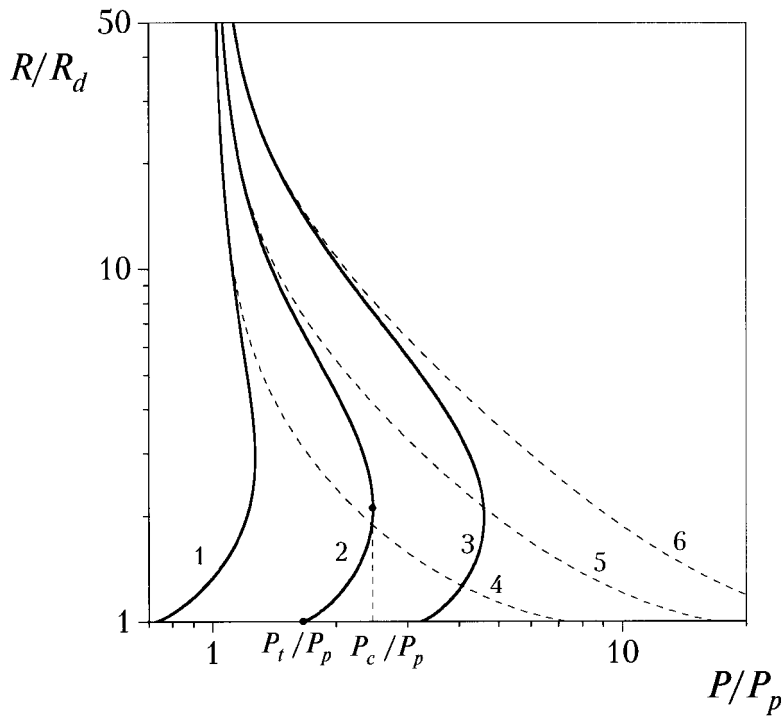


Рис. 2. Круглый дефект. Зависимость радиуса домена R от плотности мощности излучения P : сплошные линии — $\gamma = 5$, пунктирные линии — $\gamma = 0.5$. 1, 4 — $R_d/D_s = 0.25$; 2, 5 — $R_d/D_s = 0.1$; 3, 6 — $R_d/D_s = 0.05$.

случае круглого дефекта плотность мощности пробоя P_c всегда больше пороговой плотности мощности пробоя однородной пленки P_p . Для дефекта малого радиуса $R_d \ll D_s$ величина P_c приближенно описывается соотношениями

$$P_c/P_p = (\pi/4)(\gamma R_d/D_s)^{-1}, \quad \gamma < 1,$$

$$P_c/P_p = (\sqrt{\pi}/4) \left(\sqrt{\gamma - 1} R_d/D_s \right)^{-1}, \quad \gamma > 1. \quad (6)$$

Таким образом, сценарий микроволнового пробоя ВТСП пленки с нормальным дефектом определяется как формой дефекта, так и

отношением коэффициентов поглощения дефекта и пленки γ . При $\gamma > 1$ пробую предшествует промежуточная стадия образования локализованного на дефекте температурного домена, а при $\gamma < 1$ пробой происходит без образования домена. Плотность мощности пробоя P_c существенно зависит от формы дефекта; в случае линейного дефекта величина P_c может быть как больше, так и равна пороговой плотности мощности пробоя однородной пленки P_p , а в случае дефекта круглой формы величина P_c всегда больше P_p . Отметим, что для дефектов малых размеров $D_d \ll D_s$, $R_d \ll D_s$ величина P_c может существенно превышать P_p (см. формулы (4) и (6)).

В заключение отметим, что использованная в работе модель поглощения применима в высокочастотном пределе, когда квазистационарным обтеканием дефекта микроволновым током можно пренебречь. Это условие выполняется, если характерное время вытеснения тока из дефекта $\mu_0 \sigma_f R_d^2$ велико по сравнению с обратной частотой микроволнового излучения f^{-1} : $f \mu_0 \sigma_f R_d^2 \gg 1$ (здесь $\sigma_f = \sigma B_{c2}/B$ — проводимость пленки в режиме вязкого течения магнитного потока, B_{c2} — верхнее критическое поле, B — поверхностное микроволновое поле). При типичных для Y-Ba-Cu-O пленок значениях параметров $\sigma \cong 2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $B_{c2} \cong 50 \text{ Т}$ для наблюдаемых в экспериментах полей пробоя $B \cong 0.01 \text{ Т}$ [1–4] и $R_d \cong 1 \mu\text{м}$ [5] получаем, что использованная модель применима при $f \gg 10^8 \text{ Hz}$.

Авторы признательны А.А. Жарову и А.Н. Резнику за полезные обсуждения полученных результатов и предоставленную возможность ознакомиться с работой [7] до публикации.

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] *Ralston R.W.* // Supercond. Sci. Technol. 1991. V. 4. N 6. P. 386–392.
- [2] *Diete W., Aschermann B., Chaloupka H.* et al. // Applied Superconductivity 1995 (Proc. EUCAS'95). UK, Bristol: IOP. 1995. V. 2. P. 1107–1110.
- [3] *Klein N., Tellmann N., Dähne U.* et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. V. 5. N 2. P. 2663–2666.

- [4] *Hampel G., Kolodner P., Gammel P.L.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. N 4. P. 571–573.
- [5] *Hein M., Diete W., Getta M.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. N 2. P. 1264–1267.
- [6] *Жаров А.А., Коротков А.Л., Резник А.Н.* // *СФХТ.* 1992. Т. 5. № 3. С. 419–422.
- [7] *Жаров А.А., Резник А.Н.* // *ЖТФ.* 1998. Т. 68. № 1.
- [8] *Пухов А.А.* // *Письма в ЖТФ.* 1996. Т. 22. В. 12. С. 55–59.
- [9] *Бузников Н.А., Пухов А.А.* // *Письма в ЖТФ.* 1996. Т. 22. В. 20. С. 51–55.
- [10] *Buznikov N.A., Pukhov A.A.* // *Supercond. Sci. Technol.* 1997. V. 10. N 5. P. 318–324.