

05.4

Универсальное выражение для скорости распространения нормальной фазы по высокотемпературной сверхпроводящей пленке с транспортным током

© Н.А. Бузников, А.А. Пухов

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

Поступило в Редакцию 13 мая 1997 г.

Теоретически исследовано инициируемое транспортным током распространение нормальной фазы по высокотемпературной сверхпроводящей пленке, расположенной на термостабилизированной подложке. Получено универсальное выражение для скорости распространения нормальной фазы, учитывающее влияние подложки на развитие тепловой неустойчивости в пленке и применимое для произвольной зависимости критического тока от температуры. Показано, что полученное выражение позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные.

Разрушение сверхпроводимости транспортным током в высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) пленке связано с развитием в ней тепловой неустойчивости. Асимптотическое поведение нелинейной стадии развития неустойчивости характеризуется распространением по пленке фронта нормальной фазы, движущегося с постоянной скоростью. В ряде работ [1–4] величина скорости распространения нормальной фазы v измерялась экспериментально для ВТСП пленок с различными температурными зависимостями критического тока $I_c(T)$, при различных условиях охлаждения, а также при различных режимах ввода тока в пленку. В настоящей работе получено универсальное выражение для скорости распространения фронта нормальной фазы по ВТСП пленке, расположенной на термостабилизированной подложке, позволяющее удовлетворительно описать результаты экспериментов.

Величина скорости распространения нормальной фазы по пленке существенно зависит от распределения температурного поля по толщине подложки, обратная сторона которой термостабилизирована при температуре T_0 [5]. Для вычисления скорости распространения нормальной фазы v пленку и подложку необходимо рассматривать отдельно, как две взаимодействующие тепловые подсистемы. Распределение температуры T в пленке толщиной D_f и подложке толщиной D_s описывается уравнениями

$$C_f \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(T) + \frac{k_s}{D_f} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=D_f}, \quad 0 < y < D_f, \quad (1)$$

$$C_s = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad D_f < y < D_f + D_s. \quad (2)$$

Здесь C_f и C_s — теплоемкости, k_f и k_s — теплопроводности пленки и подложки соответственно, $Q(T)$ — удельная мощность джоулева разогрева, x — продольная (вдоль направления тока) координата, y — нормальная к поверхности пленки координата. В уравнении (1) учтено, что при типичном соотношении параметров $k_f D_s \gg k_s D_f$ температура пленки однородна по ее толщине, а последнее слагаемое описывает отвод тепла из пленки в подложку. Удельную мощность разогрева пленки транспортным током в простейшем приближении можно аппроксимировать ступенчатой функцией [6]: $Q(T) = (\rho l^2 / W^2 D_f^2) \cdot \eta(T - T_r)$, где ρ — удельное сопротивление пленки в нормальном состоянии, I — транспортный ток, W — ширина пленки, $T_r(I_c)$ — температура резистивного перехода, определяемая из условия $I_c(T_r) = I$, $\eta(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда.

При типичных соотношениях параметров пленки и подложки $D_f \ll D_s$, $k_f D_f \ll k_s D_s$, $C_f D_f \ll C_s D_s$ уравнения (1), (2) упрощаются [5]. Положим для простоты, что зависимостями C_s и k_s от температуры можно пренебречь. Тогда в движущейся вместе с фронтом нормальной фазы системе координат ($z = x + vt$) уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - v \cdot \frac{C_s}{k_s} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad 0 < y < D_s, \quad (3)$$

а уравнение (1) и условие термостабилизированности обратной стороны подложки превращается в следующие граничные условия к

уравнению (3)

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\frac{\rho I^2 (T_c - T_0)}{k_s D_f W^2 [T_r(I) - T_0]} \cdot \eta(z), \quad T \Big|_{y=D_s} = T_0. \quad (4)$$

Здесь T_c — критическая температура. Условия (4) означают, что вдали от фронта нормальной фазы ВТСП пленка находится в однородных сверхпроводящем ($T(z, 0) = T_0$ при $z \rightarrow -\infty$) и нормальном ($T(z, 0) = T_0 + \rho I^2 D_s / k_s W^2 D_f^2$ при $z \rightarrow \infty$) состояниях, а начало отсчета по оси z выбрано так, чтобы выполнялось условие $T(0, 0) = T_r(I)$. Уравнения (3), (4) могут быть решены методом разделения переменных, что позволяет получить для скорости распространения фронта v следующее выражение

$$1 - 2\xi = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^2 \sqrt{1 + (2\lambda_k v_h / v)^2}}, \quad (5)$$

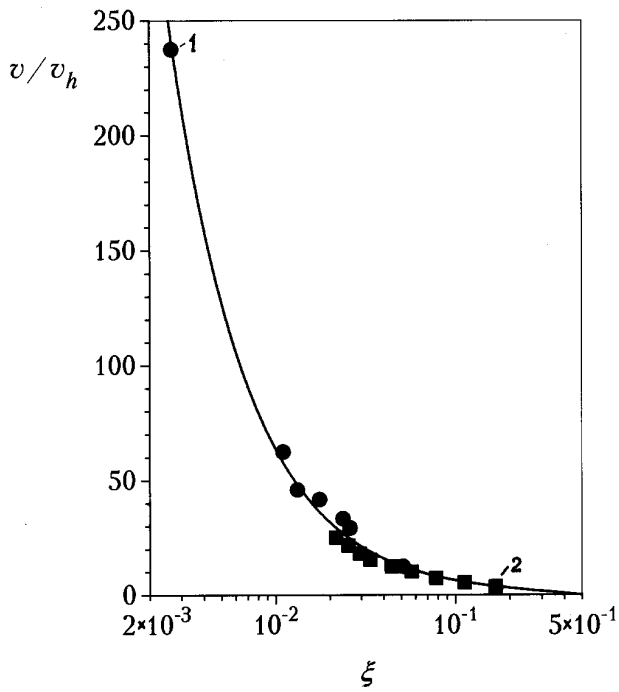
где $\lambda_k = \pi(2k + 1)/2$, $v_h = k_s / C_s D_s$ — характерная тепловая скорость, $\xi = k_s D_f W^2 [T_r(I) - T_0] / \rho I^2 D_s$ — безразмерный параметр, характеризующий отношение отвода тепла в подложку на фронте нормальной фазы к джоулеву саморазогреву нормальной области. Выражение (5) сводит зависимость скорости распространения фронта нормальной фазы v от многочисленных параметров к универсальному соотношению между v/v_h и ξ . При этом величина v равна нулю при $\xi = 1/2$ и обращается в бесконечность при $\xi = 0$. Отметим, что величина "тепловой" скорости v_h определяется только свойствами подложки и может изменяться в широком диапазоне от 10^{-2} до 1 м/с.

В случае степенной зависимости критического тока от температуры $I_c \propto (1 - T/T_c)^n$ для параметра ξ имеем

$$\xi = (1 - i^{1/n}) / \alpha i^2, \quad (6)$$

где $\alpha = \rho I_{c0}^2 D_s / k_s D_f W^2 (T_c - T_0)$ — эффективный параметр Стекли системы пленка-подложка, $i = I / I_{c0}$, I_{c0} — критический ток при $T = T_0$.

На рисунке приведено сравнение универсальной зависимости (5) с результатами экспериментов [1,2]. Рис. 1 демонстрирует достаточно хорошее согласие теоретического расчета с результатами экспериментов. Следует отметить, что приведенные на рисунке экспериментальные данные были получены на пленках с разным значением n ($n = 1$ [1] и $n = 2$ [2]), различными экспериментальными методами (стационарное



Сравнение теоретической зависимости (5) с экспериментальными данными [1,2]:
 1 — изменение температуры T_0 при фиксированном токе $I = 1.33$ А; $D_s = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $C_s = 9 \cdot 10^4$ Дж \cdot м $^{-3}$ \cdot К $^{-1}$, $k_s = 20$ Вт \cdot м $^{-1}$ \cdot К $^{-1}$, $D_f = 10^{-6}$ м, $W = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $T_c = 85.8$ К, $\rho = 4.5 \cdot 10^{-6}$ Ом \cdot м [1]. 2 — изменение тока I при фиксированной температуре $T_0 = 78$ К; $D_s = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $C_s = 2 \cdot 10^6$ Дж \cdot м $^{-3}$ \cdot К $^{-1}$, $k_s = 10$ Вт \cdot м $^{-1}$ \cdot К $^{-1}$, $D_f = 4 \cdot 10^{-7}$ м, $W = 10^{-3}$ м, $T_c = 87$ К, $\rho = 5 \cdot 10^{-7}$ Ом \cdot м, $I_{c0} = 1.7$ А [2].

протекание тока по пленке [2] и нестационарный резистивный отклик пленки на короткие импульсы тока [1]) и при различных условиях измерений (изменение тока I при фиксированном T_0 [2] и изменение T_0 при фиксированной амплитуде тока I [1]). Таким образом, универсальное соотношение (5) позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные по скорости развития тепловой неустойчивости в ВТСП пленке, полученные на разных образцах и при различных условиях эксперимента.

Авторы признательны В.Н. Скокову 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] *Dhali Sh. K., Wang L.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 61. N 13. P. 1594–1596.
- [2] *Скоков В.Н., Коверда В.П.* // СФХТ. 1993. Т. 6. № 8. С. 1646–1651.
- [3] *Skokov V.N., Koverda V.P.* // Phys. stat. sol. (a). 1994. V. 142. N 1. P. 193–199.
- [4] *Луцет М.О., Климов С.В.* // СФХТ. 1994. Т. 7. № 8–9. С. 1372–1381.
- [5] *Бузников Н.А., Пухов А.А.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 12. С. 45–49.
- [6] *Гуревич А. Вл., Миц Р.Г., Рахманов А.Л.* Физика композитных сверхпроводников. М.: Наука, 1987. 240 с.