

05.4:07

Шумовые свойства YBCO пленок с сильным пиннингом

© И.А. Хребтов, А.Д. Ткаченко, К.В. Иванов,
B. Dam, F.E. Klaassen, J.M. Huijbregtse

Всероссийский научный центр "Государственный оптический институт
им. С.И. Вавилова", С.-Петербург
Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands

Поступило в Редакцию 6 июня 2000 г.

Сообщается о шумовых исследованиях $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленок на SrTiO_3 подложках. Эпитаксиальные пленки, полученные лазерной абляцией, характеризуются совершенной структурой, узким сверхпроводящим переходом, сильным пиннингом и очень малым фликкер-шумом. Установлено, что в нормальном состоянии величина $1/f$ шума увеличивается с ростом плотности дислокаций. Наименьший шум, характеризуемый шумовым параметром Хоуге $(2-3) \cdot 10^{-6}$, наблюдается при плотности дислокаций $(8-12) \mu\text{m}^{-2}$.

Исследования природы шумов в высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) пленках и связи величины шума с технологическими условиями осаждения являются важным шагом на пути дальнейшего улучшения пороговых характеристик различных приборов криоэлектроники, таких как СКВИДы и ИК-детекторы, в том числе болометры [1,2]. Следует заметить, что со времени открытия ВТСП прогресс в технологии получения ВТСП-пленок привел к уменьшению шумового параметра Хоуге для нормального состояния $\alpha(100\text{ К})$ с 10^6 до 10^{-4} [1-3]. Тем не менее наименьшее опубликованное значение $\alpha(100\text{ К})$ для ВТСП материалов на несколько порядков превышает α для полупроводниковых материалов. С другой стороны, практический интерес представляют ВТСП пленки, обладающие сильным пиннингом и соответственно высокими значениями плотности критического тока j_c . В работе [4] сообщалось о структурно-совершенных YBCO пленках на SrTiO_3 подложках с $j_c = 10^8 \text{ А/см}^2$ при $T = 4.2\text{ К}$. В связи с этим представлялось интересным исследовать структурные, транспортные и шумовые свойства таких пленок одновременно.

Параметры образцов

Параметр	Образец				
	11В	67А	13А*	13РА1	13РА2
t, nm	202	154	158	158	158
$A, \mu\text{m}^2$	6×500	17×50	45×500	17×500	25×500
Rn, Ω	252	32	79	150	100
$\Delta\omega, \text{deg.}$	0.1	0.14	0.17	0.17	0.17
ПД, μm^{-2}	12.5	8.3	99	99	99
$\alpha(300 \text{ K}) \cdot 10^{-4}$	7.0	0.78	220	4.7	8.4
$\alpha(100 \text{ K}) \cdot 10^{-6}$	2.0	3.0	1000	43	160

Примечание: * — неотожженный образец, Rn — сопротивление в нормальном состоянии при $T \sim 100 \text{ K}$.

Для осаждения эпитаксиальных c -ориентированных $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленок толщиной (160–200) nm на (100) SrTiO_3 подложки использовали импульсный эксимерный лазер [5]. Пленки осаждались на SrTiO_3 подложки, ориентация плоскости подложки которых относительно оси c варьировалась в пределах (0.078–0.14) deg. Высокое структурное совершенство пленок подтверждалось малой величиной ширины пика 005 на полувысоте от максимума по кривой качания $\Delta\omega$ (см. таблицу). Тестовые образцы в виде мостиков (размеры указаны в таблице) с Ag-контактными площадками формировали стандартной фотолитографией. Образцы монтировались в вакуумной полости азотного криостата. Качество микроструктуры пленок анализировали рентгеноструктурным методом. Изменением температуры подложки в процессе напыления управляли плотностью дислокаций в пленках. Для определения плотности дислокаций использовали химическое травление в комбинации с методом атомно-силовой микроскопии, плотность критического тока измеряли посредством крутильной магнетометрии [4].

Для измерения напряжения шума ВТСП мостики включались по схеме с нагрузочным сопротивлением. Использование повышающего резонансного трансформатора на входе предусилителя обеспечивало шумовой уровень измерительной схемы $0.2 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ на частоте $f = 12.5 \text{ Hz}$ для сопротивления мостика $R_M < 1 \Omega$ и $1 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ при $R_M > 30 \Omega$. При измерении шумового спектра в области частот 1–80 Hz трансформатор

не использовали и чувствительность схемы определялась шумом предусилителя и составляла $4 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ на $f = 12.5 \text{ Hz}$. В связи с тем, что пленки обладали чрезвычайно низким избыточным токовым шумом в нормальном состоянии, необходимо было использовать токи смещения с плотностью до 10^6 A/cm^2 .

Зависимости шума от сопротивления и тока измерены в температурном интервале (78–300) К. Плотность дислокаций (ПД) варьировали в пределах (8–100) μm^{-2} . Температурную зависимость dR/dT получали путем измерения отклика YBCO мостиков на модулированное ИК-излучение. Известный шумовой параметр Хоуге α [6] использовался для сравнения шумовых свойств различных образцов: $\alpha = V_{1/f}^2 NAft / (IR)^2$, где $V_{1/f}^2$ — спектральная плотность мощности $1/f$ шума, I — ток смещения, N — плотность носителей тока ВТСП пленки ($N = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ в нормальном состоянии [1]), A — площадь мостика, t — толщина мостика, f — частота.

В таблице и на рис. 1, 2 приведены основные результаты исследований. YBCO пленки имеют узкий переход вблизи $T_c = 89.0 \text{ K}$ с шириной $\Delta T_c < 0.5 \text{ K}$. Отметим также, что все исследуемые мостики оставались полностью в сверхпроводящем состоянии ($R_M = 0$, $T = 78 \text{ K}$) при $j = 4 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ и при этом избыточный шум выше уровня шума измерительной схемы $\sim 0.2 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ не наблюдался. Рис. 1 показывает, что спектр шума для образца с высокой ПД = $99 \mu\text{m}^{-2}$ при комнатной температуре близок к типичному поведению $1/f^a$ шума с $a \sim 1.1$. В то же время в нормальном состоянии наблюдается более слабая частотная зависимость на частотах $< 10 \text{ Hz}$.

Шумовой параметр Хоуге $\alpha(100 \text{ K})$ для образцов с низкой ПД = (8.3–12.5) μm^{-2} значительно меньше, чем для образцов с высокой ПД = $99 \mu\text{m}^{-2}$. Для лучших образцов в нормальном состоянии $\alpha(100 \text{ K}) = (2–3) \cdot 10^{-6}$. Для таких величин α напряжение токового шума превышает шум Джонсона всего в 1.5–2 раза. Для образцов с ПД = $99 \mu\text{m}^{-2}$ этот параметр лежит в пределах (43–160) $\cdot 10^{-6}$ и то только после дополнительного отжига, который улучшает кристаллическую структуру YBCO пленки. В результате такой процедуры $\alpha(100 \text{ K})$ образцов типа 13А уменьшился, например, для образца 13РА1 в 23 раза, но, тем не менее, не достиг уровня образцов с низкой ПД. По-видимому, отжиг уменьшает плотность дефектов, которые являются источником шума. Следует отметить, что $\alpha(300 \text{ K})$ после отжига приблизился к показателям для образцов с низкой ПД. Из этого экспериментального

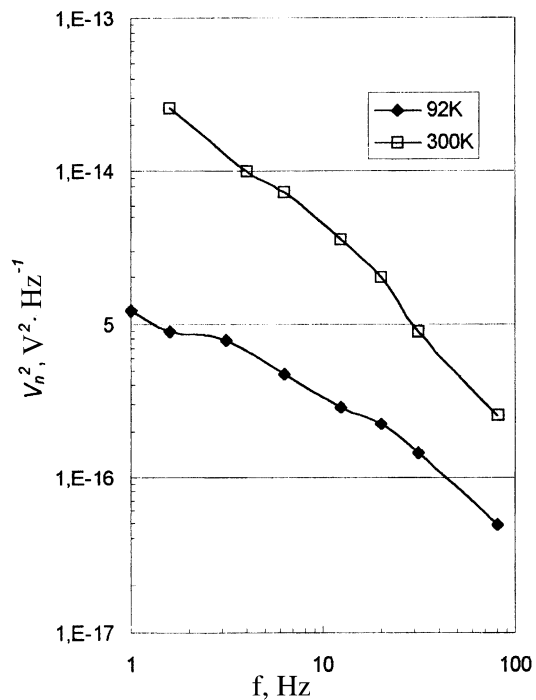


Рис. 1. Плотность спектра мощности шума $V_n^2(f)$ образца 13A при $T = 92$ К ($R_b = 79 \Omega$, $I = 29$ mA) и при $T = 300$ К ($R_b = 222 \Omega$, $I = 13$ mA).

факта можно делать вывод, что при комнатной температуре избыточный шум слабо зависит от плотности дислокаций. При этих температурах другие факторы, например переходы кислорода в решетке между позициями 01 и 05 в плоскостях CuO, играют существенную роль в механизме $1/f$ шума [7].

На рис. 2 приведены результаты измерений шума для одного из мостиков в области сверхпроводящего перехода, где поведение шума носит пиковый характер. Шумовые пики имеют максимум, совпадающий с максимумом dR/dT . Поскольку на данном этапе не проведены спектральные исследования шума на переходе из-за резонансного режима работы трансформатора, можно сделать только предварительные

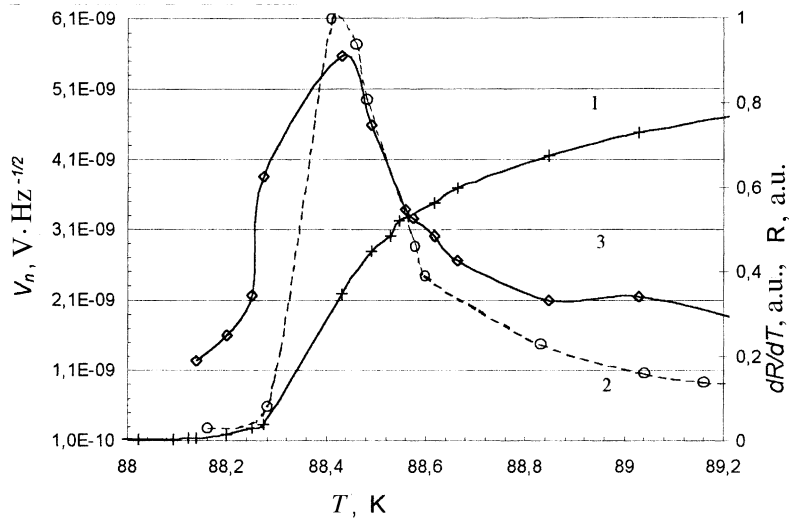


Рис. 2. Температурная зависимость R (кривая 1), dR/dT (кривая 2) и напряжения шума V_n на частоте $f = 12.5 \text{ Hz}$ образца 13РА2, $I = 8.8 \text{ mA}$, $R_n = 100 \Omega$, $\text{TKC} = 5.8 \text{ K}^{-1}$.

предположения о природе этого шума. Не исключая в качестве источников равновесные или локальные температурные флуктуации [8,9] или флуктуации проводимости из-за вариаций части сверхпроводящей фазы при протекании тока в области перехода [10], мы склонны считать, что шум пика в середине перехода обусловлен фоновым шумом ВТСП мостика, который связан с дном азотного резервуара через тепловую проводимость G . Эта составляющая шума присуща болометрам как тепловым приемникам излучения. В данном случае тепловой режим YBCO мостиков такой же, как у болометров.

Для образца 13РА2 (рис. 2) с учетом измеренных величин $R = 35 \Omega$, $I = 8.8 \text{ mA}$, $G = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ W/K}$, температурного коэффициента сопротивления $\text{TKC} = 5.8 \text{ 1/K}$ и расчетной величины теплоемкости SrTiO_3 подложки с размерами $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}$ расчетный фоновый шум в точке перехода, где TKC максимален, составляет $1.1 \cdot 10^{-8} \text{ V/Hz}^{1/2}$ для $f \ll 12.5 \text{ Hz}$, что в 2 раза больше измеренной величины на $f = 12.5 \text{ Hz}$. Для образца 11В расхождение составляет 4.5 раза.

По-видимому, из-за большой постоянной времени "боллометрической структуры", состоящей из мостика и массивной подложки, измеренный шум имеет отмеченное выше расхождение с расчетом. В расчете не учитывалось уменьшение фононного шума из-за тепловой постоянной времени, которая не измерена. Для понимания механизма пикового шума необходимо исследовать шумы ВТСП мостиков с меньшими размерами, чтобы тепловая проводимость была обусловлена только тепловым сопротивлением на границе пленка-подложка и влияние теплоемкости подложки на частотные свойства фононного шума было исключено.

В заключение можно отметить, что впервые у ВТСП пленок в нормальном состоянии достигнут шумовой параметр Хоуге $2 \cdot 10^{-6}$, что близко к полупроводниковым кристаллическим материалам. Установлено, что величина избыточного шума снижается при уменьшении плотности дислокаций. Рекордные шумовые параметры достигнуты за счет совершенной структуры YBCO пленок, выращенных на SrTiO₃ подложках высокого качества. Следует для сравнения отметить, что ранее для YBCO пленок на SrTiO₃ с $\Delta\omega = 0.3 \text{ deg.}$ мы зарегистрировали значительно большую величину $\alpha(100 \text{ K}) = 3 \cdot 10^{-4}$ [2].

Работа поддерживается российской программой "Сверхпроводимость", проект 98031 и программой FOM (Нидерланды).

Список литературы

- [1] Kiss L.B., Svedlindh P. // IEEE Trans. on Electron Devices. 1994. V. 41. P. 2112–2122.
- [2] Khrebtov I.A., Leonov V.N., Tkachenko A.D. et al. // Proc. SPIE. 1998. V. 3287. P. 288–299.
- [3] Karmanenko S.F., Semenov A.A., Khrebtov I.A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2000. V. 13. P. 273–286.
- [4] Dam B., Huijbregtse J.M., Klaassen F.C. et al. // Nature. 1999. V. 399. P. 439–442.
- [5] Dam B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 1581–1583.
- [6] Hooge F.H., Kleinpenning T.G. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 479–532.
- [7] Bobyl A.V., Gaevskii M.E., Karmanenko S.F. et al. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 1274–1280.
- [8] Voss R.F., Clarke J. // Phys. Rev. 1976. B13. P. 556–573.
- [9] Kozub V.I. // Phys. Rev. 1994. B49. P. 6895–6902.
- [10] Song Yi., Crooker P.P., Gains J.R. // Phys. Rev. 1992. B45. P. 7574–7576.