

05;09;12

СВЧ шум тонкопленочного $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ мостика в резистивном состоянии

© О.Г. Вендик, В.Н. Кейс, А.Б. Козырев, С.Г. Колесов, Т.Б. Самойлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 22 сентября 1995 г.)

Представлены результаты измерений на частоте 4.6 ГГц эффективной входной температуры шума T_e мостика, выполненного из высокоориентированной пленки YBaCuO . Мостик переводился в слаборезистивное состояние постоянным током, СВЧ излучением частотой 9.4 ГГц или их совместным действием. Одновременно с температурой шума измерялись ВАХ и импеданс мостика на частоте 4.6 ГГц. При $T = 78$ К значения T_e не превышали 120 К. Анализ полученных результатов позволил сравнить экспериментальные значения T_e с величинами, определяемыми равновесным найквистовским шумом перегретых нормальных доменов, и предположить наличие избыточных шумов по уровню соизмеримых с найквистовскими шумами.

Введение

Измерение шумовых характеристик является неотъемлемой частью исследований разрабатываемых на основе сверхпроводниковых пленок приборов и устройств микроэлектроники СВЧ, так как наличие шумов определяет их чувствительность. Во многих из таких приборов используется резистивное состояние сверхпроводникового элемента: быстродействующие $S-N$ -ключи [1–3], фильтры-ограничители [4,5], амплитудные модуляторы [6], а также активные приборы — болометры и смесители [7,8]. Резистивное состояние сверхпроводникового элемента инициируется как внешним управляющим сигналом (в ключах, модуляторах), так и СВЧ сигналом повышенного уровня (ограничители, смесители), поэтому важны исследования шумовых характеристик сверхпроводникового элемента под действием постоянного и СВЧ токов, а также при их совместном воздействии на элемент. В настоящее время не существует единой точки зрения на природу шумов пленок ВТСП, находящихся в резистивном состоянии. Большинство работ, посвященных исследованию высокочастотного шумового излучения ВТСП, связано с исследованием гранулированных структур, в которых регистрируемые шумы связаны с джозефсоновской генерацией в слабых межгранульных контактах [9,10]. Ряд работ посвящен исследованию низкочастотного $1/f$ -шума, возникающего за счет флуктуаций сопротивления [11] или за счет некоррелированного движения магнитного потока [12] вблизи критической температуры. В болометрах и смесителях, основанных на эффекте разогрева электронного газа в резистивном состоянии сверхпроводниковой пленки, основным механизмом шумов являются флуктуации температуры электронной подсистемы [13].

Следует отметить, что упомянутые выше шумовые измерения проведены в резистивном состоянии, близком к нормальному. В настоящей работе представле-

ны результаты измерений на частоте $f_0 = 4.6$ ГГц эффективной входной температуры шума T_e мостика, выполненного из высокоориентированной пленки YBaCuO . Мостик переводился в слаборезистивное состояние ($R \leq 5 \cdot 10^{-2} R_N$) постоянным током, СВЧ излучением на частоте $f_1 = 9.4$ ГГц или их совместным действием. Одновременно с температурой шума T_e были измерены ВАХ и импеданс YBaCuO мостиков на частоте $f_0 = 4.6$ ГГц при различных уровнях мощности СВЧ излучения. Анализ полученных данных позволил сравнить экспериментальные значения T_e с величинами, определяемыми равновесным найквистовским шумом перегретых нормальных N доменов.

Образцы и методика эксперимента

Пленки YBaCuO толщиной $d = 200$ нм осаждались методом лазерного испарения на плоскость r -среза монокристаллического сапфира толщиной $h = 500$ мкм. Пленки имели монокристаллическую блочную структуру с осью c , перпендикулярной плоскости подложки. Поверхностное сопротивление пленок на частоте 60 ГГц составляло $5 \cdot 10^{-3}$ Ом при $T = 4.2$ К и $5 \cdot 10^{-2}$ Ом при $T = 78$ К.

Тонкопленочные образцы, использовавшиеся в шумовых измерениях, были изготовлены в виде мостиков длиной $l = 1$ мм, шириной $w = 20$ мкм (рис. 1) методом фотолитографии. YBaCuO мостики характеризовались критической температурой $T_c = 87-88$ К, шириной сверхпроводящего перехода $\Delta T_c = 1.0-1.5$ К, удельным сопротивлением при $T = 100$ К $\rho(100 \text{ К}) = 1-2 \cdot 10^{-6}$ Ом/м, отношением сопротивлений при $T = 300$ К и 100 К $\rho(300 \text{ К})/\rho(100 \text{ К}) = 2.5-3$, средней по сечению критической плотностью тока $j_c = 10^6$ А/см² при $T = 78$ К. Блок-схема установки для шумовых измерений показана на рис. 1. Установка содержала стандартное

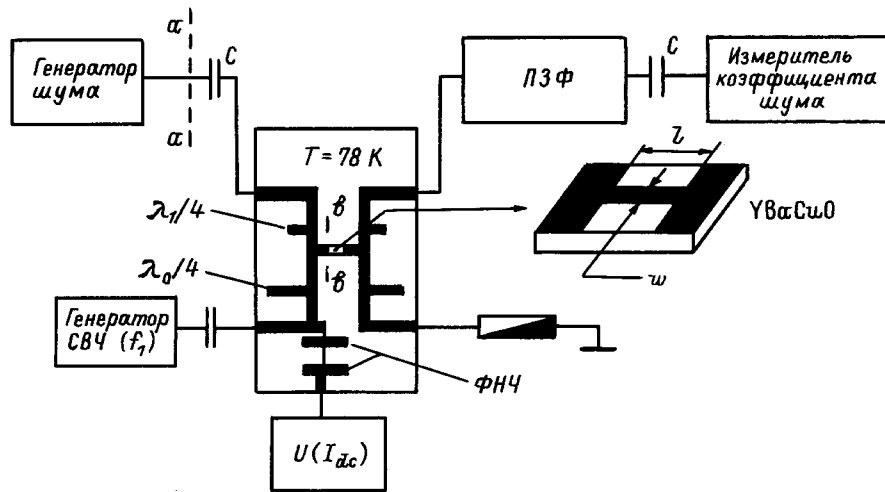


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования шумов YBaCuO мостика.

оборудование для измерения шумов. Магнетронный СВЧ генератор обеспечивал подачу на YBaCuO мостик сигнала накачки частотой 9.4 ГГц. Низкочастотная часть схемы позволяла пропускать через мостик постоянный ток смещения и регистрировать вольт-амперные характеристики мостика одновременно с измерением шумов.

Исследуемый YBaCuO мостик включался в разрыв микрополосковой линии, являющейся элементом СВЧ микросхемы на основе пленок меди. Топология микросхемы (рис. 1) содержит разомкнутые λ/4-шлейфы и фильтр нижних частот, которые обеспечивают развязку цепей СВЧ накачки, шумового сигнала и постоянного тока. Полосно-заграждающий фильтр на входе измерителя шума обеспечивает дополнительную защиту от воздействия мощного сигнала

накачки. Блокировочные конденсаторы служат для изоляции СВЧ приборов от источника постоянного тока. Все измерения проводились при T = 78 К.

В процессе экспериментов YBaCuO мостик переводился в резистивное состояние пропусканием постоянного тока и/или тока СВЧ накачки. Измерялись эффективная входная шумовая температура T_{еΣ} измерительной схемы (в плоскости a-a на рис. 1), а также модуль коэффициента передачи мостика и потери, вносимые входным и выходным трактами на частоте 4.6 ГГц. Эти измерения позволяют рассчитать эффективную входную температуру шума мостика T_е, эквивалентную температуре пассивного резистора, который, будучи включенным на вход нешумящего мостика (в плоскости b-b на рис. 1), обеспечивал бы ту же выходную шумовую мощность, что и реальный мостик.

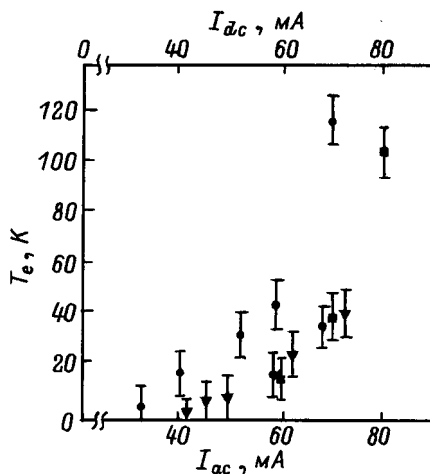


Рис. 2. Зависимость температуры шума T_е YBaCuO мостика от постоянного тока I_{дс} (■) и амплитуды тока СВЧ I_{свч} при I_{дс} = 0 (▼) и 45 мА (●).

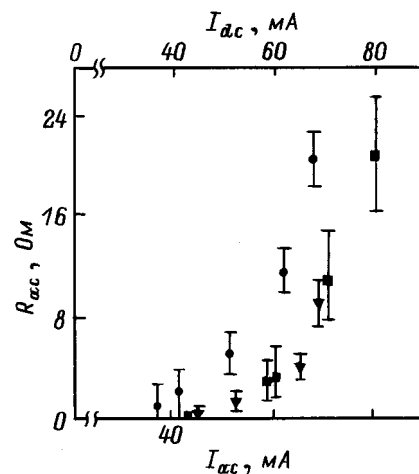


Рис. 3. Зависимость активной части R_{акс} импеданса YBaCuO мостика на f = 4.6 ГГц от постоянного тока I_{дс} (■) и амплитуды тока СВЧ I_{свч} при I_{дс} = 0 (▼) и 45 мА (●).

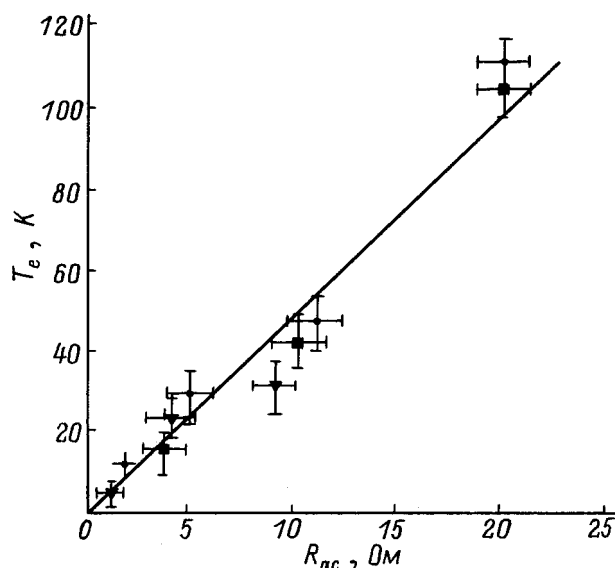


Рис. 4. Связь между температурой шума T_e и активной составляющей R_{ac} импеданса мостика, установленная на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 2 и 3.

Величина активной части импеданса мостика R_{ac} на частоте 4.6 ГГц была получена из измерений коэффициента передачи с учетом геометрической индуктивности мостика. Индуктивность мостика оценивалась по коэффициенту передачи мостика в мейснеровском состоянии (в отсутствие СВЧ накачки и постоянного тока) и составляла $L \cong 0.9$ нГн.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные зависимости эффективной температуры шума T_e $YBaCuO$ мостика от величины внешнего воздействия, переводящего мостик в резистивное состояние, показаны на рис. 2 для трех типов воздействия: пропускание постоянного тока смещения I_{dc} , облучение СВЧ сигналом накачки (I_{ac} — амплитуда тока СВЧ), воздействие СВЧ сигнала одновременно с пропусканием постоянного тока $I_{dc} = 45$ мА. Во всех случаях измерения проводились в диапазоне токов $0 \leq I_{dc}, I_{ac} \leq 2I_c$, где I_c — критический ток мостика, регистрируемый на статической ВАХ в отсутствие СВЧ облучения как ток, при котором напряжение на мостике достигало 5 мкВ (для представленного здесь образца $I_c = 45$ мА). Из рис. 2 видно, что в рассматриваемом диапазоне токов для исследуемого элемента T_e не превышает 120 К; зависимости $T_e(I_{dc})$ и $T_e(I_{ac})$ практически идентичны; пропускание постоянного тока увеличивает шумовой отклик на СВЧ накачку.

На рис. 3 показаны экспериментальные значения активной части импеданса мостика R_{ac} , измеренные

на частоте 4.6 ГГц при различных уровнях внешних воздействий, аналогичных показанным на рис. 2. Видно, что зависимости R_{ac} от постоянного тока смещения и амплитуды тока СВЧ накачки идентичны в пределах погрешности измерений.

Обращает на себя внимание одинаковый характер зависимостей T_e и R_{ac} от величины тока, что позволяет установить простую связь между T_e и R_{ac} для $YBaCuO$ мостика в слабрезистивном состоянии, проиллюстрированную на рис. 4. Эта связь может быть приближенно описана выражением $T_e = A \cdot R_{ac}$, где $A = 5 \pm 1$ К/Ом и не зависит от величины тока. Для мостика с сопротивлением R_{ac} , включенного последовательно в линию передачи с волновым сопротивлением Z_0 , эффективная входная температура шума T_e определяется по известной формуле $T_e = T_a \cdot R_{ac} / Z_0$, где T_a — эквивалентная температура шума исследуемого мостика, равная физической температуре пассивного резистора с сопротивлением R_{ac} , дающего ту же спектральную плотность мощности шумов, что и реальный источник шума ($YBaCuO$ мостик). Согласно экспериментальным данным, во всем исследованном диапазоне токов величина T_a составляла $T_a = A \cdot Z_0 = 250 \pm 50$ К.

Обсуждение результатов

Чтобы проанализировать полученные результаты измерения температуры шума, рассмотрим особенности статической ВАХ мостика. На рис. 5 показана серия статических ВАХ при различных уровнях мощности СВЧ излучения частотой 9.4 ГГц. Известно, что для широких пленок сверхпроводников появление резистивности на ВАХ связано с неустойчивостью

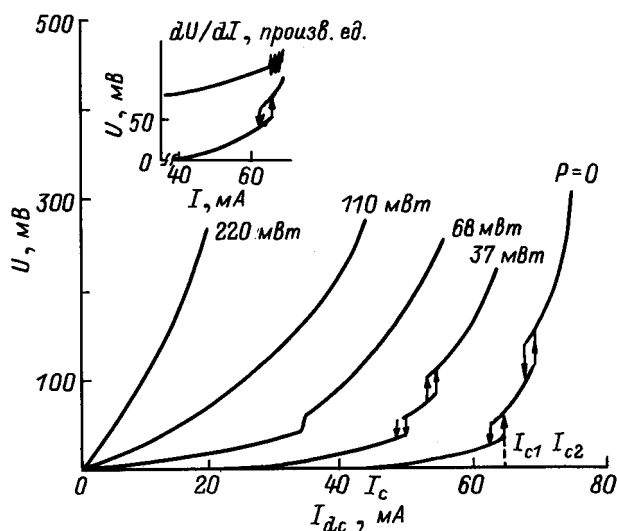


Рис. 5. Статические ВАХ $YBaCuO$ мостика при различных уровнях мощности P СВЧ сигнала частотой 9.4 ГГц. На вставке приведен фрагмент производной начального участка ВАХ для $P = 0$.

мейснеровского состояния при достижении критической плотности тока распаривания на краях пленки: при токе I_c в пленку проникают вихри собственного магнитного поля транспортного тока. Диссипация энергии на линиях движения вихрей приводит к локальному разогреву образца, снижающему потенциальный барьер для вхождения вихрей, увеличению их плотности, росту диссипируемой энергии и т.д. [14]. Начальный резистивный участок ВАХ оказывается нелинейным и обычно имеет квадратичный характер, что подтверждается линейностью ее производной (вставка на рис. 5). В области низких температур (в наших экспериментах $T/T_c \leq 0.9$) этот же лавинообразный процесс приводит к скачкообразному возникновению на линии движения вихрей нормального домена, температура в центре которого превышает T_c , а минимальная длина равна удвоенной длине остывания l_T . На ВАХ этот эффект проявляется как скачок напряжения при токе I_{c1} (рис. 5). Тепловая неустойчивость начального резистивного состояния как причина наблюдаемых скачков напряжения на ВАХ подтверждается наличием гистерезиса на обратном ходе ВАХ, а также неизменностью уровня суммарной рассеиваемой мощности (2.4 мВт), при которой наблюдается скачок напряжения на ВАХ, измеренных при различных уровнях СВЧ мощности. Величина сопротивления возникающего скачкообразно N -домена ΔR не зависит от внешних условий (постоянного тока, СВЧ мощности) и составляет $\Delta R = 0.5$ Ом. Это значение хорошо согласуется с сопротивлением N -домена минимальной длины $l_{\min} = 2l_T$. Характерную тепловую длину можно оценить как $l_T = (k \cdot d/\alpha)^{1/2}$, где $k = 10$ Вт/(м·К) — теплопроводность пленки в плоскости ab в температурном интервале 78–200 К [7]; $\alpha^{-1} = (h_{\text{eff}}/k_{\text{sub}}) + R_T$ — термическое сопротивление при теплоотводе в подложку; $R_T = 10^{-7}$ К·м²/Вт [7] — термическое сопротивление границы раздела между пленкой и подложкой; k_{sub} — теплопроводность подложки (для сапфира k_{sub} составляет 10^3 Вт/(м·К) при 78 К и 300 Вт/(м·К) при 100 К [15]); h_{eff} — эффективная толщина слоя подложки, участвующего в теплоотводе (например, для цилиндрического растекания тепла в подложке $h_{\text{eff}} \cong (w/\pi) \cdot \ln(8h/w)$). Для исследуемых пленок $l_T(80\text{ К}) = 0.5$ мкм, так что сопротивление N -домена минимальной длины при $\rho(100\text{ К}) = 200$ мкОм·см составляет $\Delta R = 0.5$ Ом и соответствует наблюдаемым на рис. 5 скачкам ВАХ.

При увеличении тока выше тока скачка возможен разогрев соседних участков пленки, рождение новых цепочек вихрей с последующим формированием нового элементарного N -домена при токе I_{c2} (рис. 5). Наряду с N -доменами в остальных областях пленки может сохраняться движение вихрей. Воздействие СВЧ облучения смещает ВАХ в область меньших токов, причем рассматриваемые особенности ВАХ сохраняются по крайней мере до уровней мощности,

не сильно превышающих критическое значение, при котором I_c обращается в нуль.

Уже отмеченный выше одинаковый характер зависимостей T_e и R_{ac} от постоянного тока и амплитуды тока накачки дает возможность утверждать, что формируемая резистивная N – S -структура не зависит от вида воздействия (постоянный ток или СВЧ облучение). Пропускание постоянного тока при воздействии СВЧ накачки приводит к увеличению количества N -доменов при том же значении тока накачки.

Оценим физическую температуру N -доменов и сравним ее с приведенными значениями T_a . Ограничиваясь только теплоотводом в подложку, перегрев ΔT N -доменов можно приблизительно оценить, исходя из плотности диссипируемой в домене мощности при пропускании постоянного или СВЧ токов как $\Delta T = P/(\alpha \cdot w^2)$, где $P = \rho_N I^2/d$ — плотность диссипируемой мощности, I — постоянный ток смещения или действующее значение тока СВЧ накачки. Для максимальной в наших экспериментах величины тока 80 мА при значениях ρ_N и k_{sub} , соответствующих $T = 100$ К, оценка перегрева N -домена дает $\Delta T = 30$ К, так что физическая температура домена T_{ph} в экспериментах не превышала 120 К. Таким образом, физическая температура исследуемого YBaCuO мостика, переведенного в резистивное состояние постоянным или СВЧ током, ниже полученной экспериментально эквивалентной температуры шума T_a . Это указывает на наличие дополнительного источника избыточного шума, природа которого отлична от найквистовой.

Заключение

В резистивном состоянии, обусловленном пропусканием через мостик постоянного и/или СВЧ токов, не более чем в 2 раза превышающих критическое значение, величина эффективной входной температуры шума T_e мостика, изготовленного из высокоориентированной пленки YBaCuO, не превышала 120 К, а эквивалентная температура шума мостика T_a составляла 250 ± 50 К независимо от величины тока.

Характерные особенности ВАХ YBaCuO мостика при одновременном воздействии СВЧ облучения позволяют заключить, что при $T = 78$ К в рассматриваемом диапазоне токов и СВЧ мощности резистивное состояние связано с формированием перегретых нормальных областей, являющихся источником равновесного теплового (найквистовского) шума.

Наблюдаемое количественное превышение экспериментальных значений температуры шума над оценками шумовой температуры, обусловленной найквистовскими шумами, позволяет предположить наличие избыточных шумов в резистивном состоянии пленки, по уровню соизмеримых с найквистовскими шумами. Для установления природы избыточных шумов требуются дополнительные эксперименты.

Список литературы

- [1] *Caio W.-L., Liu Y.-Q. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. Vol. 3. P. 2848.
- [2] *Nagai Y., Hebert D.F., Van Duzer T. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 63. P. 830.
- [3] *Гайдук М.М., Козырев А.Б., Осадчий В.Н.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. С. 86.
- [4] *Gaidukov M.M., Vendik O.G., Kolesov S.G. et al.* // Electron. Lett. 1990. Vol. 26. P. 1229.
- [5] *Keis V.N., Kozyrev A.B., Samoilova N.B., Vendik O.G.* // Electron. Lett. 1993. Vol. 29. P. 546.
- [6] *Козырев А.Б., Самойлов Т.Б., Шаферова С.Ю.* // СФХТ. 1993. Т. 6. № 4. С. 1823.
- [7] *Langlois P., Robbes D. et al.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. P. 3858.
- [8] *Konstantinian A.A., Hayrapetian R.B., Martirosian R.M.* // Phys. B. 1991. Vol. 173. P. 313.
- [9] *Konopka J., Sobolewski R., Jung G. et al.* // IEEE Trans. MTT. 1990. Vol. 38. P. 160.
- [10] *Jung G., Konopka J.* // Europhys. Lett. 1989. Vol. 10. P. 183.
- [11] *Lacoe R.C., Hurrell P., Springer K. et al.* // IEEE Trans. Mag. 1991. Vol. 27. P. 2832.
- [12] *Lee J.H., Lee S.C., Khim Z.G.* // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 40. P. 6806.
- [13] *Ekstrom H., Karasik B., Kollberg E. et al.* // IEEE MTT. Special Spase Terahertz Issiue. 1995.
- [14] *Иванченко Ю.М., Михеенко П.Н.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 488.
- [15] *Кожеевников И.Г., Новицкий Л.А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.