

09:12

Сигнальные и шумовые характеристики терагерцового частотно-селективного джозефсоновского $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ детектора

© М.В. Лятки, Д.А. Ткачев, Ю.Я. Дивин

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

E-mail: matvey_l@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2006 г.

В терагерцовом диапазоне частот исследовались сигнальные характеристики частотно-селективного джозефсоновского детектора на основе бикристаллического $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ перехода с взаимно наклоненными осями [001]. При частоте внешнего излучения 0.692 THz и температуре детектора 55 K были получены значения вольт-ваттной чувствительности, достигающие $(7 \pm 2) \cdot 10^4 \text{ V/W}$, что соответствовало теоретическим оценкам с учетом тепловых флуктуаций в переходе. Измеренные значения эквивалентной шумовой мощности (NEP) и динамического диапазона (D) по мощности, равные $(2.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$ и $47 \pm 3 \text{ dB}$ соответственно, определялись избыточными шумами перехода типа $1/f$. Показано, что можно достигнуть значений NEP до $5 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$ и D свыше 60 dB при использовании высокочастотных модуляторов или импульсных источников терагерцового излучения.

PACS: 07.57.Kp

Появление новых импульсных источников излучения в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне частот [1–3] предъявляет повышенные требования к быстродействию и динамическому диапазону детекторов, используемых в этом частотном диапазоне. Одним из самых быстродействующих детекторов в терагерцовой и субтерагерцовой области частот является частотно-селективный детектор на основе джозефсоновского перехода [4]. Недавно было показано, что даже при температуре 80 K эквивалентная шумовая мощность (NEP) и динамический диапазон по мощности частотно-селективного детектора на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ бикристаллического джозефсоновского перехода на частоте 100 GHz могут достигать $8 \cdot 10^{-15}$ и $2 \cdot 10^5 \text{ W/Hz}^{1/2}$ соответственно [5], что позволяет проводить исследования импульсных источников субтерагерцового излучения [6].

Однако характеристики частотно-селективного детектора на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ джозефсоновского перехода в терагерцовом диапазоне частот на настоящий момент недостаточно изучены. Также малоизученным является вопрос о зависимости динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора от параметров джозефсоновского перехода. Критерий верхней границы динамического диапазона по мощности, предложенный для частотно-селективного детектора в работе [5], базируется на аналитическом выражении для зависимости амплитуды ступеней тока от мощности внешнего сигнала в случае сильного внешнего сигнала [4]. Но в работе [5] аналитическое решение использовалось в переходной области между режимами слабого и сильного сигнала, что привело к недооценке верхней границы динамического диапазона по мощности примерно в $5 \div 10$ раз.

В технике часто используется так называемый 3 dB критерий отклонения от линейности, в котором верхней границей динамического диапазона детектора считается мощность P_s , при которой наблюдается двукратное отклонение величины выходного сигнала детектора от линейного закона. При помощи численного моделирования зависимости амплитуды частотно-селективного отклика от мощности внешнего сигнала, согласно 3 dB критерию, нами были найдены значения P_s для различных температур $T = 40 \div 80$ К, сопротивлений джозефсоновского перехода $R_n = 1 \div 20 \Omega$ и безразмерных частот внешнего излучения $\omega = hf/2eI_cR_n$ в диапазоне $0.3 \div 10$, где f — размерная частота, а I_c — критический ток джозефсоновского перехода. Оказалось, что найденный при помощи численного моделирования ход зависимости $P_s(\omega, T, R_n)$ может быть описан выражением

$$P_s = 10R_n \left[2\pi \left(\frac{2e}{h} \right) kT \frac{3 + 2\omega^2}{\omega} \right]^2. \quad (1)$$

Согласно данным моделирования, формула (1) оценивает величину верхней границы динамического диапазона частотно-селективного детектора с точностью не хуже 5% при условии, что $(4\pi kTe/hI_c) \leq 5 \cdot 10^{-2}$. Проверка предложенного критерия верхней границы динамического диапазона по мощности на экспериментальных данных, представленных в работе [5], показывает, что измеренная величина $P_s = 2 \cdot 10^{-9}$ W с точностью до ошибки эксперимента согласуется с теоретической оценкой по формуле (1), которая дает значение $P_s = 2.6 \cdot 10^{-9}$ W.

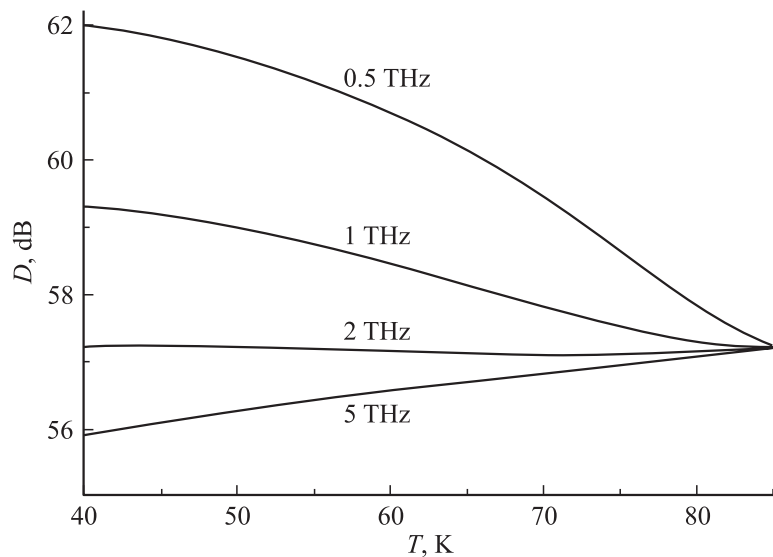


Рис. 1. Расчетные зависимости динамического диапазона по мощности D частотно-селективного детектора на основе джозефсоновского перехода от температуры T при различных частотах внешнего сигнала. Сопротивление перехода 1Ω . Шумы перехода обусловлены тепловыми флуктуациями. Характерное напряжение $I_c R_n(T)$ равно $750 \mu\text{V}$ при $T = 77 \text{ K}$, а $d(I_c R_n)/dT \approx 75 \mu\text{V/K}$.

Динамический диапазон по мощности детектора равен $D = P_s / (NEP \cdot \Delta F^{1/2})$, где P_s — верхняя граница динамического диапазона по мощности, а ΔF — частотная полоса, в которой измеряется выходной сигнал детектора. Согласно формуле (1) и выражению для NEP , предложенному в [5], была вычислена температурная зависимость величины динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора на основе джозефсоновского перехода с сопротивлением 1Ω при различных частотах внешнего сигнала. Результаты вычислений для $\Delta F = 1 \text{ Hz}$ показаны на рис. 1. При расчетах использовались типичные параметры перспективных бикристаллических $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ переходов с взаимно наклоненными осями [001] [7,8]. Из рис. 1 видно, что величина динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора слабо зависит от температуры и в терагерцовом диапазоне частот составляет примерно 60 dB.

В качестве частотно-селективных детекторов нами использовались $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ бикристаллические джозефсоновские переходы с взаимно наклоненными осями [001] [7,8]. Их сигнальные характеристики были исследованы на частоте $f = 0.692 \text{ THz}$. Выбор частоты 0.692 THz обусловлен стабильностью мощности излучения используемого лазера FIRL 100, работавшего на парах HCOOH , в основной моде и возможностью эффективно согласовать это излучение с джозефсоновским переходом на данной частоте. Модуляция излучения лазера с эффективностью 100% осуществлялась при помощи механического прерывателя на частоте $f_m = 1.8 \text{ kHz}$. Ослабление пучка излучения производилось при помощи набора тонкопленочных аттенуаторов. Отклик напряжения ΔV джозефсоновского перехода измерялся при помощи синхронного детектора на частоте $f_m = 1.8 \text{ kHz}$ с потоянной времени $\tau = 5 \text{ ms}$. Из измеренных зависимостей отклика ΔV от среднего напряжения V на переходе определялись амплитуды частотно-селективного отклика при напряжениях $V \cong hf/2e$ [5].

Зависимости амплитуды частотно-селективного отклика от поглощенной мощности внешнего излучения представлены на рис. 2 для перехода с сопротивлением $R_n = 4.1 \Omega$ при температурах 55, 65 и 75 К. Для абсолютной калибровки оси поглощенной мощности было использовано известное теоретическое значение, соответствующее первому минимуму зависимости критического тока от мощности [4]. Для уточнения величины поглощенной мощности внешнего излучения экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) сравнивались с результатами численного моделирования, основанного на резистивной модели. Экспериментальные ВАХ, соответствующие отсутствию внешнего излучения и первому подавлению критического тока внешним излучением, показаны на вставке рис. 2.

На рис. 2 видно, что при малых мощностях внешнего излучения амплитуда отклика напряжения ΔV перехода линейно зависит от мощности P излучения. Значения вольт-ваттной чувствительности $r_V = \Delta V/P$, полученные из экспериментальных зависимостей $\Delta V(P)$ при разных температурах для частотно-селективного джозефсоновского детектора на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ при частоте внешнего сигнала 0.692 THz , приведены в таблице. Как видно из таблицы, полученные значения вольт-ваттной чувствительности с точностью до ошибок эксперимента совпадают с теоретическими оценками, что свидетельствует о хорошем согласии характеристик использованных бикристаллических

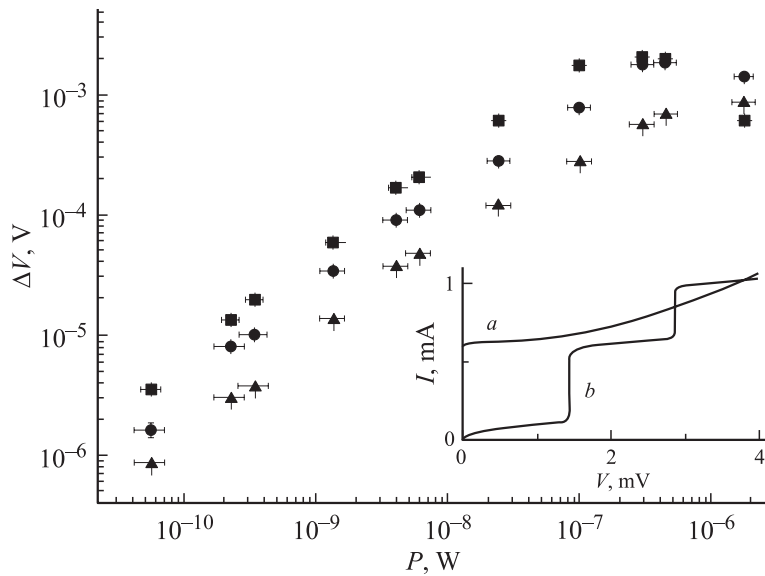


Рис. 2. Экспериментальные зависимости амплитуды частотно-селективного отклика напряжения ΔV бикристаллического $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ перехода от мощности P поглощенного монохроматического излучения с частотой 0.692 THz при температуре 55 K (квадраты), 65 K (круги), 75 K (треугольники). Характерное напряжение перехода $I_c R_n$ равнялось 2.6 , 1.7 и 0.9 mV при температуре 55 , 65 , 75 K соответственно. На вставке показаны экспериментальные вольт-амперные характеристики перехода при $T = 55 \text{ K}$, соответствующие отсутствию внешнего излучения (*a*) и первому подавлению критического тока излучением (*b*).

переходов с резистивной моделью. Экспериментальные величины вольт-ваттной чувствительности до $(7 \pm 2) \cdot 10^4 \text{ V/W}$ были достигнуты при температуре 55 K .

Также в таблице приведены величины NEP , полученные из экспериментальных данных по формуле $NEP = S_V^{1/2}/r_V$, где S_V — спектральная плотность мощности флуктуаций напряжения, измеренная на частоте 1.8 kHz при напряжении $hf/2e = 1.43 \text{ mV}$. Спектральная плотность мощности S_V флуктуаций напряжения перехода при смещении 1.43 mV имела вид $1/f_m$, а ее величина на частоте $f_m = 1.8 \text{ kHz}$ примерно на три порядка превышала значение тепловых шумов перехода. Для срав-

T, ω	Способ	$r_V, \text{V/W}$	$NEP, \text{W/Hz}^{1/2}$	D, dB
$T = 55 \text{ K},$ $\omega = 0.55$	Теория	$6 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^{-15}$	63
	Эксперимент	$(7 \pm 2) \cdot 10^4$	$(2.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-13}$	47 ± 3
$T = 65 \text{ K},$ $\omega = 0.86$	Теория	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-15}$	62
	Эксперимент	$(4 \pm 1) \cdot 10^4$	$(2.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-13}$	47 ± 3
$T = 75 \text{ K},$ $\omega = 1.6$	Теория	$2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-15}$	61
	Эксперимент	$(1.6 \pm 0.5) \cdot 10^4$	$(3.4 \pm 1.0) \cdot 10^{-13}$	46 ± 3

нения в таблице приведены оценки r_V и NEP , вычисленные согласно резистивной модели с учетом тепловых флуктуаций. Лучшие экспериментальные величины NEP , достигнутые в температурном интервале 55–75 К, составляли $(2.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$. При повышении частот модуляции излучения до мегагерцового диапазона частот, что приведет к уменьшению шумов типа $1/f_m$ до уровня тепловых флуктуаций у исследовавшихся переходов, возможна реализация величин NEP около $5 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

Из рис. 2 следует, что амплитуда отклика напряжения при $T = 55 \text{ K}$ отклоняется от линейного закона в два раза при поглощенной мощности внешнего излучения P_s , равной $(1.5 \pm 1.0) \cdot 10^{-8} \text{ W}$, что соответствует величине динамического диапазона P_s/NEP , по мощности равной $47 \pm 3 \text{ dB}$ в частотной полосе 1 Hz. Величины динамического диапазона, полученные из экспериментальных данных аналогичным образом при других температурах, также приведены в таблице. Измеренные величины верхней границы динамического диапазона по мощности P_s также с точностью до ошибок эксперимента согласуются с формулой (1), полученной при помощи численного моделирования зависимости амплитуды частотно-селективного отклика от мощности внешнего сигнала в рамках резистивной модели. Экспериментальные величины динамического диапазона по мощности для исследовавшихся переходов были в несколько десятков раз меньше, чем соответствующие теоретические величины, из-за избыточных шумов типа $1/f_m$.

Таким образом, нами экспериментально показано, что джозефсоновские частотно-селективные детекторы, работающие при температурах, достижимых с помощью жидкого азота, в терагерцовом диапазоне обладают величинами вольт-ваттной чувствительности до $7 \cdot 10^4 \text{ V/W}$,

эквивалентной шумовой мощности $NEP \cong 3 \cdot 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$, и динамического диапазона по мощности $D \cong 47 \text{ dB}$. Экспериментальные величины NEP и динамического диапазона из-за избыточных флуктуаций типа $1/f$ в переходах были в несколько десятков раз хуже, чем аналогичные величины, рассчитанные в режиме ограничения параметров джозефсоновских детекторов тепловыми флуктуациями. Следует ожидать, что при использовании более высокочастотных модуляторов или импульсных источников терагерцового излучения джозефсоновские детекторы, работающие при азотных температурах, будут иметь величины NEP около $5 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$ и динамического диапазона около 60 dB .

Авторы благодарны А.А. Волкову за предоставление аттенуаторов терагерцового излучения и В.В. Павловскому за программу численного моделирования динамики джозефсоновских переходов, а также В.Н. Губанкову и К. Урбану за интерес к работе.

Данная работа частично финансировалась Федеральным агентством по науке и инновациями по государственному контракту 02.434.11.1010 и Исследовательским центром г. Юлиха (Германия).

Список литературы

- [1] Köhler R., Tredicucci A., Beltram F. et al. // Nature. 2002. V. 417. N 6885. P. 156–159.
- [2] Carr G.L., Martin M.C., McKinney W.R. et al. // Nature. 2002. V. 420. N 6912. P. 153–156.
- [3] Baker C., Gregory I.S., Tribe W.R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83 (20). P. 4113–4115.
- [4] Лухарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М., 1978. С. 63.
- [5] Широков В.В., Дивин Ю.Я. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 12. С. 79–84.
- [6] Shiroto V., Divin Y., Poppe U. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2003. V. 13. (2). P. 172–175.
- [7] Divin Y.Y., Poppe U., Jia C.L. et al. // Physica C. 2002. V. 372–376. P. 115–118.
- [8] Divin Y.Y., Kotlyanskiy I.M., Shadrin P.M. et al. // Appl. Supercond. 2003. 2004. IOP Conf. Series. N 181. Ed. A. Andreone et al. P. 3112–3118.