

02;09

Частотно-селективный $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ джозефсоновский детектор: динамический диапазон по мощности в субтерагерцевом диапазоне частот

© В.В. Широков, Ю.Я. Дивин

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: votoriw@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 декабря 2003 г.

В субтерагерцевом диапазоне частот экспериментально исследовался динамический диапазон по мощности частотно-селективного $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ джозефсоновского детектора, предназначенного для применения в Гильберт-спектроскопии. При температуре джозефсоновского детектора 80 К достигнута величина динамического диапазона $2 \cdot 10^5$ при уровне эквивалентной шумовой мощности NEP, равной $8 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

В последнее время в различных областях физики появились мощные источники излучения субтерагерцевого и терагерцевого диапазонов, работающие в импульсном режиме [1–3]. По сравнению с традиционными детекторами и спектрометрами, использовавшимися при анализе излучения от этих источников, Гильберт-спектроскопия [4] на основе частотно-селективного джозефсоновского детектора из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [5] может оказаться более предпочтительной благодаря малой постоянной времени, широкой области принимаемых частот и высокой чувствительности. Однако для практической реализации этой возможности необходимо знать также динамический диапазон по мощности входного излучения для детектора данного типа.

Ранее были проведены лишь качественные оценки динамического диапазона джозефсоновских приемных устройств различных принципов ([6], гл. 23). В данной работе с учетом специфики использования частотно-селективного джозефсоновского детектора из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в Гильберт-спектроскопии предложен количественный критерий для его динамического диапазона и представлены результаты экспериментального исследования этого диапазона при азотных температурах.

Динамический диапазон $D = P_s/P_0$ детектора равен отношению максимальной мощности P_s , при которой зависимость отклика детектора от мощности излучения отклоняется от линейной, к минимальной мощности P_0 , определяемой эквивалентной шумовой мощностью NEP и частотной полосой ΔF регистрирующей схемы: $P_0 = NEP \cdot \Delta F^{1/2}$. В рамках резистивной модели джозефсоновского перехода при использовании выражений для отклика и собственных шумов из [6] для NEP частотно-селективного джозефсоновского детектора в нормировке на поглощенную мощность получается формула $NEP = 8\sqrt{2}\pi \cdot (2e/h) \cdot (kT)^{3/2} \cdot R_n^{1/2} \cdot ((3 + 2\omega^2)^{3/2}/\omega)$, где T — температура, R_n — нормальное сопротивление перехода, $\omega = hf/(2eI_c R_n)$ — безразмерная, а f — размерная частоты сигнала, I_c — критический ток джозефсоновского перехода. Величины мощности P_0 и динамического диапазона зависят от частотной полосы ΔF и здесь будут приводиться для $\Delta F = 1$ Hz.

При больших мощностях излучения частоты f в отклике джозефсоновского перехода кроме основной резонансной особенности при $V_1 = hf/2e$ возникает особенность при $V_2 = 2V_1$, которая при восстановлении спектра с помощью Гильберт-спектроскопии дает паразитную линию на частоте $2f$. Определим верхнюю границу динамического диапазона как мощность, при которой паразитная линия в восстановленном спектре в 10 раз меньше основной. Учитывая специфику Гильберт-спектроскопии, т.е. умножение отклика при восстановлении спектра на ток и на напряжение [4], получаем, что отношение амплитуд особенностей в отклике должно быть не меньше 40. Используя функции Бесселя J_1 и J_2 от аргумента, пропорционального амплитуде тока, наведенного внешним излучением, для аппроксимации поведения резонансных особенностей при больших мощностях излучения [6] получаем для максимальной амплитуды тока формулу $A_s = 0.1 \cdot I_c \omega$, а для оценки верхней границы динамического диапазона: $P_s = 5 \cdot 10^{-3} \cdot I_c^2 R_n \omega^2$. Данная оценка учитывает специфику использования Гильберт-спектроскопии и определяет степень допустимых искажений получаемых результатов в отличие от оценки, основанной на качественном сравнении мощностей джозефсоновской генерации и взаимодействующего с ней сигнала, приведенной в [6], где $P_s = 0.1 \cdot I_c^2 R_n$.

На рис. 1 представлены теоретические оценки динамического диапазона частотно-селективного джозефсоновского детектора в зависимости от рабочей температуры при различных частотах и сопротивлениях

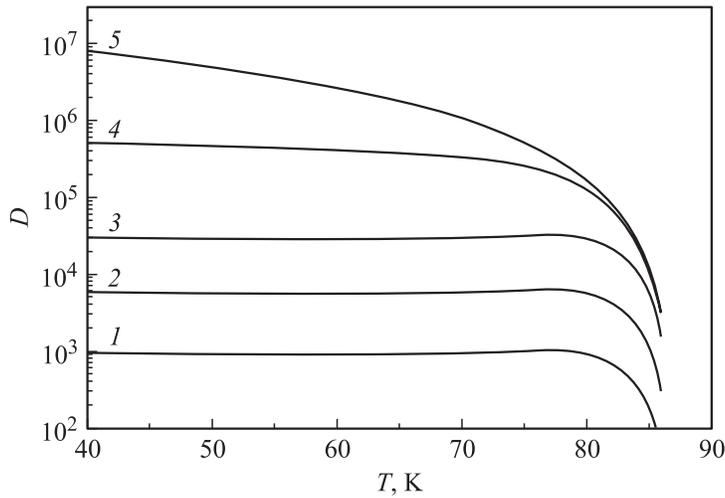


Рис. 1. Оценочные зависимости от температуры T динамического диапазона D селективного отклика бикристаллического $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ джозефсоновского перехода при различных частотах и нормальных сопротивлениях переходов. Характерное напряжение $V_c = I_c R_n$ считалось одинаковым и равным $300 \mu\text{V}$ при $T = 77 \text{ K}$, а $dV_c/dT \approx 25 \mu\text{V/K}$. 1 — $f = 100 \text{ GHz}$, $R_n = 10 \Omega$; 2 — $f = 100 \text{ GHz}$, $R_n = 3 \Omega$; 3 — $f = 100 \text{ GHz}$, $R_n = 1 \Omega$; 4 — $f = 300 \text{ GHz}$, $R_n = 1 \Omega$; 5 — $f = 1000 \text{ GHz}$, $R_n = 1 \Omega$.

переходов. При расчетах использовались характерные параметры бикристаллических $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ переходов на подложке из NdGaO_3 [7], использовавшихся в экспериментальной части работы. Как следует из представленных графиков, увеличение динамического диапазона происходит при понижении нормального сопротивления джозефсоновского перехода и при повышении частоты сигнала. Первое связано с понижением уровня собственных шумов джозефсоновского перехода, а второе — с уменьшением ширины собственной линии джозефсоновской генерации и соответствующим увеличением ее интенсивности в области, где ω имеет значение, сравнимое с единицей.

Для экспериментального исследования динамического диапазона селективного джозефсоновского детектора был выбран 3-мм диапазон, в котором существуют достаточно мощные источники монохромати-

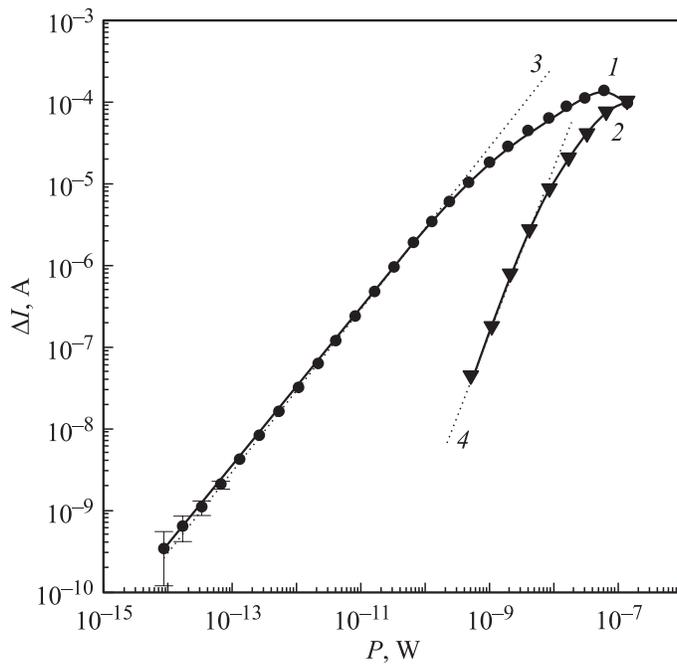


Рис. 2. Экспериментальная зависимость амплитуд ΔI частотно-селективного отклика джозефсоновского перехода с параметрами: $R_n = 1.2 \Omega$, $I_c R_n = 220 \mu V$ при $T = 80 K$ от мощности P поглощенного монохроматического излучения с частотой $f = 86 GHz$: 1 — резонансная особенность при $V_1 = hf/2e$, 2 — резонансная особенность при $V_2 = 2V_1$. Пунктирные линии указывают асимптоты поведения амплитуд особенностей при малых мощностях излучения: 3 — $\Delta I \propto P$, 4 — $\Delta I \propto P^2$ соответственно.

ческого излучения, прецизионные измерители мощности и калиброванные аттенюаторы. В детекторе использовались бикристаллические $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ переходы [7] со значениями нормального сопротивления R_n от 0.5 до 3 Ω . Измерения ВАХ и откликов на излучение с частотой $f = 86 GHz$ были проведены в режиме заданного напряжения с использованием криогенного предусилителя LNA-1618 с шумами $1.6 \cdot 10^{-10} V/Hz^{1/2}$ [8].

Данные, полученные из серии измерений откликов одного из джозефсоновских переходов, представлены на рис. 2. Для абсолютной

нормировки оси мощностей было использовано теоретическое значение, при котором амплитуда отклика первый раз достигает максимума [6]. Реперная точка шкалы мощностей, определенная с точностью около 25%, составила $6.6 \cdot 10^{-8}$ W. При этом горизонтальная шкала демонстрирует мощность излучения, поглощенного в переходе. Тем самым представлена характеристика детектора и отсутствует влияние согласования. При проведении серии измерений использовались калиброванные аттенюаторы: перестраиваемый с ослаблением $0 \div 60$ dB и двухпозиционный с ослаблением 0 и 20 dB. Сшивка экспериментальных данных производилась в районе нормированной мощности $5 \cdot 10^{-12}$ W.

Как видно из графика на рис. 2, зависимость амплитуды частотно-селективного отклика при $V_1 = hf/2e$ от мощности поглощенного излучения при малых мощностях хорошо аппроксимируется законом, а амплитуда паразитной особенности при $V_2 = 2V_1$ ведет себя пропорционально квадрату мощности. В данном эксперименте значение NEP составило величину $(8 \pm 5) \cdot 10^{-15}$ W/Hz^{1/2}, которая весьма близка к теоретической величине $8 \cdot 10^{-15}$ W/Hz^{1/2}, получающейся при предположении джонсоновских шумов джозефсоновского перехода, которые в данном случае составляли величину $1.6 \cdot 10^{-10}$ V/Hz^{1/2}. Для сравнения, ранее экспериментально измеренные значения NEP составляли: $2.7 \cdot 10^{-14}$ W/Hz^{1/2} при $T = 10$ K [9] и $10^{-13} \div 10^{-14}$ W/Hz^{1/2} при $T = 4$ K [10].

Динамический диапазон, определенный по тому же критерию, что и при теоретических оценках, составил около $2 \cdot 10^5$. При этом оказалось, что экспериментальные величины амплитуды основной селективной особенности отклонялись от величин, определяемых по линейной зависимости, не более чем в два раза. Ампер-ваттная чувствительность внутри динамического диапазона оказалась равной $(3 \pm 1) \cdot 10^4$ A/W.

Из анализа рис. 2 следует, что при мощности, соответствующей верхней границе динамического диапазона ($2 \cdot 10^{-9}$ W), амплитуда паразитного отклика при $V_2 = 2V_1$ пропорциональна квадрату мощности. Кроме того, данная точка находится в переходной области между режимами слабого и сильного сигналов при рассмотрении процесса образования основной особенности. Этими фактами объясняется значительно более низкое значение теоретической оценки динамического диапазона по отношению к экспериментально полученной величине.

Как следует из приведенных выше оценочных формул, величина динамического диапазона D должна быть обратно пропорциональна $R_n^{3/2}$

при постоянной величине $I_c R_n$ и частоте f . Эта тенденция подтверждается экспериментально полученным значением динамического диапазона в $6 \cdot 10^4$ для другого $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ перехода с $R_n = 2.7 \Omega$.

Полученные величины динамического диапазона порядка 10^5 превосходят наши предварительные результаты [11], где в режиме задания тока была получена величина около $2 \cdot 10^4$. Новые результаты позволяют проводить быстрые измерения с помощью частотно-селективного джозефсоновского детектора с отношением сигнал/шум порядка 10^2 при полосе $\Delta F = 10^6$ Hz.

Таким образом, для частотно-селективного джозефсоновского детектора из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ при рабочей температуре 80 К экспериментально достигнут уровень $NEP = 8 \cdot 10^{-15}$ W/Hz^{1/2} в нормировке на поглощенную мощность. При этом экспериментально реализован динамический диапазон для излучения 3-мм диапазона в $2 \cdot 10^5$. Согласно приведенным оценкам, величина динамического диапазона может быть повышена при использовании джозефсоновских переходов с более низким сопротивлением и для более высокочастотного излучения.

Данная работа частично финансировалась Международным научно-техническим центром (МНТЦ, проект N 1912) (Россия), а также 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. N 20. P. 4113–4115.
- [4] Дивин Ю.Я., Полянский О.Ю., Шульман А.Я. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 17. С. 1056–1061.
- [5] Divin Y., Volkov O., Shiroto V. et al. // Advances in Solid State Phys. Berlin: Springer, 2001. V. 41. P. 301–313.
- [6] Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М., 1978. 447 с.
- [7] Дивин Ю.Я., Котелянский И.М., Губанков В.Н. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 10. С. 1238–1249.
- [8] Ukhansky N.N., Dorrer L., Schmidl F. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1999. V. 9. N 2. P. 4416–4419.

- [9] *Андреев А.В., Дивин Ю.Я., Губанков В.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 24–28.
- [10] *Tarasov M., Shul'man A., Polyansky O.* et al. // Proc. Int. Conf. on MM & Submm Waves and Appl. Denver. 1996. P. 89–90.
- [11] *Shirotov V., Divin Y., Urban K.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2001. V. 11. N 1. P. 955–958.