

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.4>

УДК: 51-37, 537.9, 53.05

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ YBaCuO ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ПЕРЕХОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Е.А. Матророва<sup>1,2</sup>, Д.В. Мастеров<sup>1</sup>, С.А. Павлов<sup>1</sup>, А.Е. Парафин<sup>1</sup>, Л.С. Ревин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, 603087, ГСП-105, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Лаборатория сверхпроводниковой наноэлектроники, 603950, г. Нижний Новгород, Нижегородская область, Минина ул., 24

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2022 г.

**Аннотация.** Для джозефсоновских бикристаллических YBaCuO переходов шириной 1,5 и 3 мкм измерен отклик на внешний сигнал частотой 165 ГГц. Для исследования были выбраны приемники с близкими значениями  $I_C R_N$  при гелиевых температурах и разными значениями  $R_N$ . Измерены амплитуды ступеней Шапиро для различных мощностей внешнего сигнала и температур образцов. Измерена зависимость выходного шума по напряжению от рабочей точки, температуры, мощности внешнего сигнала. Показано, что флуктуации критического тока имеют наибольшее влияние на выходной шум приемника. Проведена оценка вольт-ваттной чувствительности и мощности эквивалентной шуму для частоты 165 ГГц. Проведено сравнение экспериментальных результатов с численными расчетами на основе модели резистивно-ёмкостного шунтированного джозефсоновского перехода. Показаны оптимальные рабочие диапазоны температур для каждой из структур.

**Ключевые слова:** YBaCuO джозефсоновский переход, бикристаллическая граница, широкополосный детектор, чувствительность, модель RCSJ.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10384).

**Автор для переписки:** Ревин Леонид Сергеевич, [rls@ipmras.ru](mailto:rls@ipmras.ru)

## **Введение**

Высококочувствительные микроволновые детекторы необходимы для биомедицинских исследований, контроля безопасности и мониторинга атмосферы. Во всех этих областях сверхпроводящие устройства, такие как широкополосные и частотно-селективные джозефсоновские детекторы, смесители, гильберт-спектрометры обладают широкой перспективой. В отличие от ниобиевых детекторов, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) могут иметь более высокие рабочие температуры и более широкую частотную характеристику. Например, джозефсоновский  $\text{YBaCuO}$  детектор использовался для регистрации слабого сигнала от  $\text{BiSrCaCuO}$  мезаструктуры при рабочей температуре 25 К [1]. ВТСП джозефсоновский переход также использовался для анализа импульсного 2,2 ТГц излучения от квантово-каскадных лазеров, расположенных в той же криогенной среде при температуре 50 К [2].

В данной статье исследованы характеристики двух джозефсоновских бикристаллических  $\text{YBaCuO}$  детекторов с разными параметрами, работающих в диапазоне температур от 10 до 77 К под действием внешнего сигнала частотой 165 ГГц. Показано влияние нормального сопротивления переходов при близком характерном напряжении структур.

## **1. Экспериментальная схема и теоретическая модель**

Чип, содержащий несколько структур с бикристаллическими джозефсоновскими переходами, был изготовлен путем магнетронного напыления пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  на поверхность  $\text{Zr}_{1-x}\text{Y}_x\text{O}_2$  бикристаллической подложки с углом разориентации  $24^\circ$  в плоскости [001] методом задающей маски [3]. Два перехода, рассмотренные в работе, имели толщину 0,1 мкм и различались по ширине примерно в два раза: 1,5 мкм (стр. №1) и 3 мкм (стр. №2).

Для широкополосной связи с внешним излучением каждый переход был интегрирован с логопериодической планарной антенной с дизайном, описанным в [4], рис. 1. Образец был установлен в криостат замкнутого цикла, позволяющий характеризовать образцы в широком диапазоне температур от гелиевых до 80 К. ТГц сигнал передавался по квазиоптической схеме с рупорами и инфракрасными фильтрами с использованием генератора обратной волны и фокусировался на переходе с помощью кремниевой гиперполусферической линзы. Излучение ослаблялось механическим аттенюатором и электрически управляемым аттенюатором на PIN-диоде, в котором чередуются области электронной (n) проводимости, собственный, нелегированный, полупроводник (i) и дырочной (p) проводимости. Каждый аттенюатор был откалиброван комнатным измерителем мощности, в результате их совместное использование позволяло изменять мощность падающего излучения более чем на 8 порядков. Отклик по напряжению измеряли методом синхронного детектирования на частоте 100 Гц.

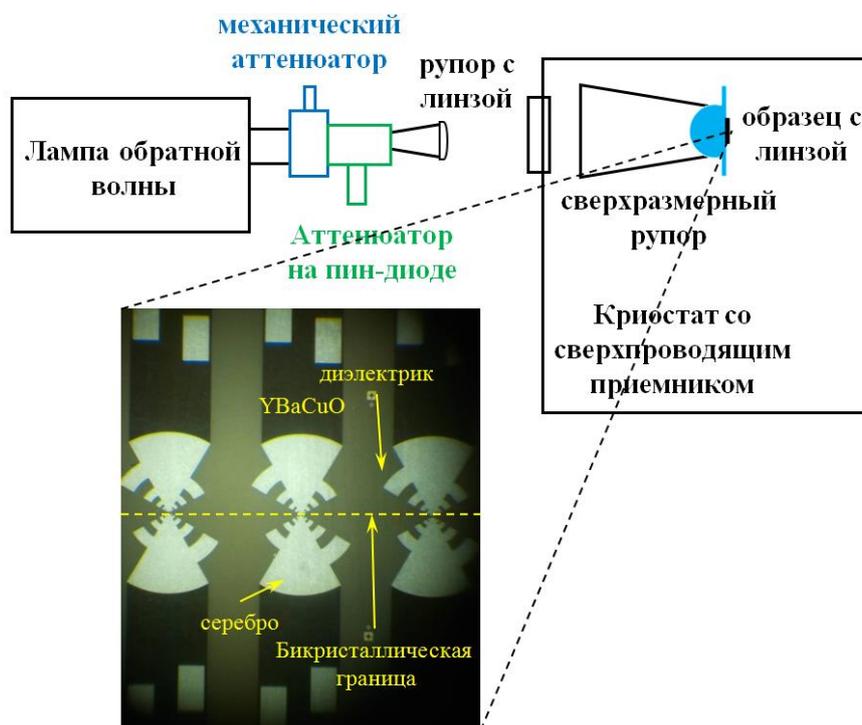


Рис. 1. Схематическое изображение измерительного стенда вместе с оптической фотографией образца с джозефсоновскими детекторами

Теоретический анализ и аппроксимация экспериментальных данных выполнены с использованием модели резистивно-ёмкостного шунтированного перехода (RSCJ), в которой переход с критическим током  $I_C$ , ёмкостью  $C$ ,

нормальным сопротивлением  $R_N$  описывается стохастическим дифференциальным уравнением:

$$C \cdot (dV/dt) + V/R_N + I_C \cdot \sin(F_{mw} 2\pi t) + I_F = I_B \quad (1)$$

Напряжение  $V$  определяется как производная джозефсоновской фазы  $\varphi$ ,  $V = (d\varphi/dt) \cdot 2\pi\Phi_0$ , где  $\Phi_0$  – квант магнитного потока; тепловые флуктуации  $I_F$  рассматриваются как белый гауссовский шум с нулевым средним и функцией корреляции  $\langle I_F(t) \cdot I_F(t+\tau) \rangle = (k_B T) / (\pi R_N) \cdot \delta(\tau)$ . Гармонический сигнал с амплитудой  $I_{mw}$  и частотой  $F_{mw} = \omega_{mw} / 2\pi$  описывает внешнее излучение с мощностью  $P_{mw} = (I_{mw}^2 \cdot R_N) / 2$ .

## 2. Результаты

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) двух структур при различных рабочих температурах. Несмотря на то, что площади переходов различались в два раза, разница в параметрах структур отличалась на порядок. Это может быть связано с меньшей эффективной площадью бикристаллического перехода. Тем не менее, эти образцы позволяют сравнить характеристики широкополосного детектирования при близких характерных напряжениях  $I_C R_N$  (при низких температурах), но разных нормальных сопротивлениях и критических токах.

Структуры демонстрируют поведение резистивно-шунтированного перехода при температурах выше 50 К и различимый гистерезис для температуры 10 К (стр. №1). Это позволило определить значения емкости и параметра затухания  $\alpha = (1/R_N) \cdot (\hbar / (2eI_C C))^{-2}$  с помощью численной аппроксимации. В таблице 1 приведены характеристики переходов для различных температур. Полученные из аппроксимации значения  $R_N$  и  $C$  различаются, что может быть связано с неточностью модели.

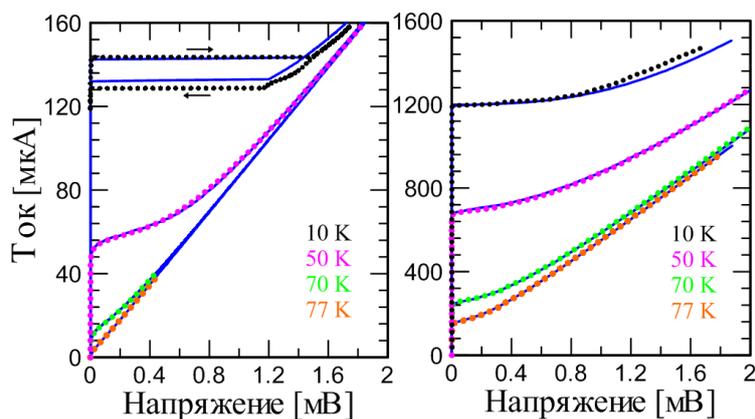


Рис. 2. ВАХ для стр. №1 (слева) и стр. №2 (справа) для разных температур без внешнего сигнала. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – численная аппроксимация

Таблица 1. Параметры двух структур, полученные из аппроксимации экспериментальных измерений численными вычислениями

Температура, К	Параметры стр. №1 и стр. №2				
	Критический ток $I_C$ , мкА	Нормальное сопротивление, $R_N$ , Ом	Емкость, С, пФ	Произведение $I_C R_N$ , мВ	Параметр затухания, $\alpha$
77	5 / 160	11,5 / 1,88	0,03 / 0,10	0,058 / 0,30	4,06 / 2,41
70	15,4 / 260	11,5 / 1,88	0,05 / 0,05	0,177 / 0,49	1,79 / 2,67
50	60 / 700	11,5 / 1,80	0,04 / 0,05	0,690 / 1,26	0,99 / 1,70
10	140 / 1300	11,9 / 1,60	0,03 / 0,10	1,600 / 2,08	0,74 / 1,00

Измерив зависимость критического тока и высоту ступеней Шапиро от внешнего сигнала с частотой 165 ГГц, можно оценить мощность излучения перехода. На рис. 3 показаны экспериментальные данные для стр. №2, аппроксимированные численным расчетом. Измеренные характеристики хорошо согласуются с RSCJ моделью. Параметром подгонки здесь было отношение мощности, поглощаемой в детекторе, к падающей мощности, которая была откалибрована,  $P_{\text{погл}} = k \cdot P_{\text{пад}}$ . Эти потери мы связываем с неидеальным

согласованием источника и приемника, несоответствием импедансов ВТСП джозефсоновского перехода и широкополосной антенны [4] и потерями в бикристаллической подложке. Это значение менялось в зависимости от температуры:  $k = 0,08$  (10 К);  $0,095$  (55 К);  $0,1$  (77 К). Разброс параметра  $k$  может быть связан с неточностью аппроксимации данных, особенно в области малых  $\alpha$  (в области низких температур).

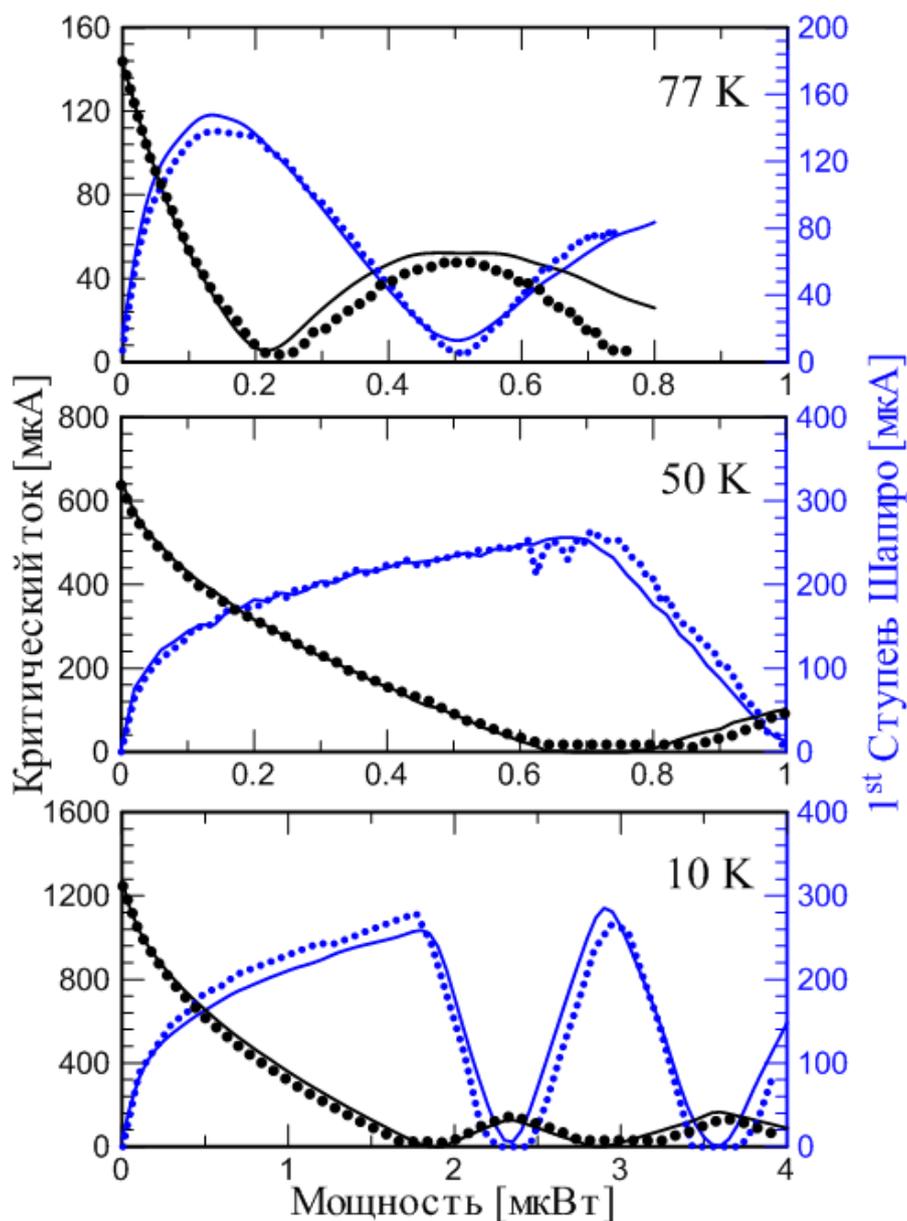


Рис. 3. Критический ток (левая ось) и высота 1-й ступени Шапиро (правая ось) в зависимости от мощности внешнего сигнала на частоте 165 ГГц для стр. №2 при различных температурах. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – численное моделирование

Приемные характеристики широкополосных джозефсоновских детекторов анализировались в режиме задания тока. При токе питания близком к критическому (положение максимума  $d^2V/dI^2$ ) приращение напряжения связано с изменением мощности падающего сигнала. Подбирая оптимальное смещение, мы получаем максимальный отклик напряжения на внешний сигнал при заданной мощности. Тогда чувствительность определяется как производная  $r_V = dV/dP_{mw}$ . Амплитуда отклика по напряжению  $\Delta V$  является линейной функцией мощности излучения при малых значениях этой мощности. Таким образом, чувствительность постоянна для малых внешних сигналов и спадает с увеличением падающей мощности. Вольт-ваттная чувствительность для стр. №2 представлена на рис. 4 для разных температур. Получено хорошее согласие между экспериментом и численным моделированием. Максимальная чувствительность значительно снижается с повышением температуры. Другой важной характеристикой является верхний предел по мощности  $P_S$  – уровень мощности излучения, при котором чувствительность детектора уменьшается в два раза относительно своего максимального значения. Как видно из рис. 4, это значение увеличивается с повышением температуры.

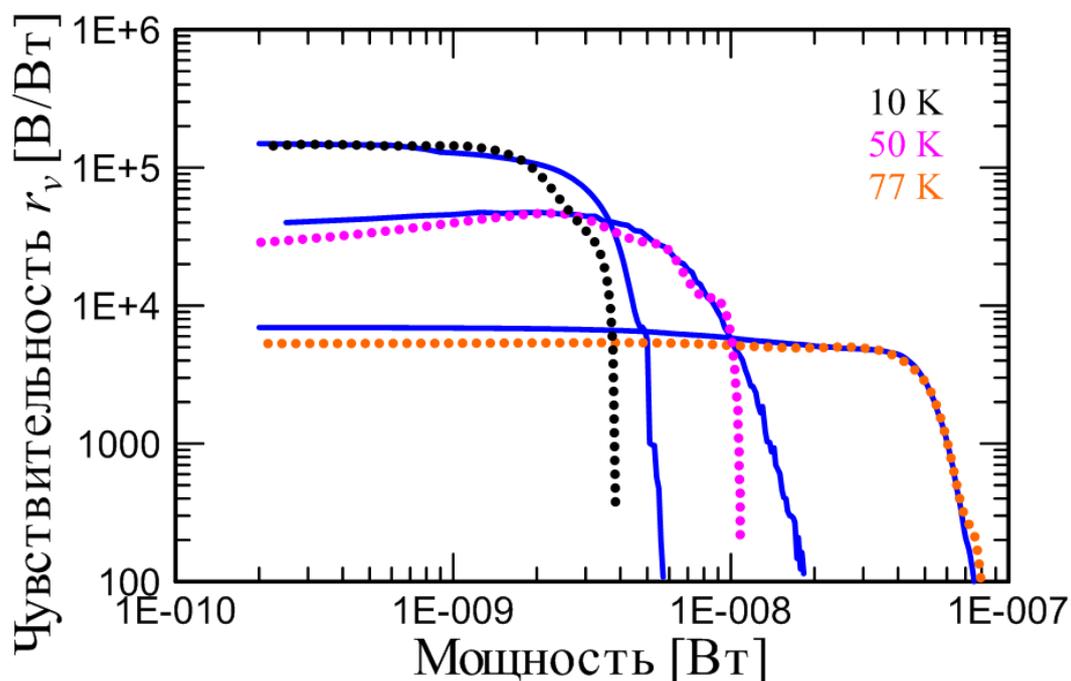


Рис. 4. Чувствительность напряжения стр. №2 в зависимости от мощности внешнего сигнала частотой 165 ГГц для различных температур. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – численное моделирование

Мы также измерили шумовые характеристики джозефсоновских детекторов. Измеренный входной шум малошумящего усилителя составил  $\delta V_{\text{amp}}=10$  нВ/(Гц)<sup>1/2</sup>. Низкочастотный шум напряжения  $\delta V$  в ВТСП джозефсоновских переходах связан с флуктуациями критического тока  $\delta I_C$  и флуктуациями нормального сопротивления  $\delta R_N$ . Для джозефсоновского перехода с безгистерезисной ВАХ спектр выходного напряжения при фиксированном токе питания определяется как [5]:

$$S_V(F)=(V-R_d I)^2 \cdot S_I(F)+V^2 \cdot S_R(F), \quad (2)$$

где  $R_d$  — дифференциальное сопротивление;  $S_I=|\delta I_C/I_C|^2$  и  $S_R=|\delta R_N/R_N|^2$  связаны с механизмами транспорта куперовских пар и квазичастиц соответственно. Таким образом, общий шум выходного напряжения джозефсоновского перехода равен  $\delta V_{\text{total}}=(\delta V_{\text{amp}}^2+S_V)^{1/2}$ . Получение флуктуационных параметров джозефсоновского перехода из экспериментальных выходных шумов имеет большие практическое и теоретическое значения.

Наконец, мы оценили мощность эквивалентную шуму (NEP) детектора, используя выходной шум и измеренную чувствительность напряжения детектора:  $\text{NEP}=\delta V/r_V$ . Мы также исследовали динамический диапазон по мощности  $D=P_S/\text{NEP} \cdot (\Delta F)^{-2}$ , где  $\Delta F$  — полоса частот, в которой измерялся выходной сигнал.

В Таблице 2 представлены сводные характеристики двух широкополосных детекторов. Сначала проанализируем значения чувствительности, полученные для двух структур. При температуре 77 К структура №1 имеет меньшее значение  $r_V$ , чем структура №2. Это может быть связано с резким снижением  $I_C R_N$  для стр. №1 по сравнению со стр. №2. Кроме того, при малом критическом токе ВАХ может быть сглажена за счет флуктуаций и технических помех. Для температур 50 К и 10 К значение  $r_V$  для стр. №1 в 1,7–2 раза больше, чем для стр. №2. Это согласуется с теорией: для двух структур с близким значением  $I_C R_N$  чувствительность увеличивается с увеличением нормального сопротивления до определенного значения [6].

Для количественного сравнения экспериментальных шумовых характеристик с уравнением (2) мы брали данные только при температурах выше 50 К, где было показано, что наши переходы близки к резистивно-шунтированной модели. Используя фиттинг параметров, мы получили значения  $S_I$  и  $S_R$ . Анализ показал, что флуктуации напряжения  $S_R$  в основном незначительны. Что касается флуктуаций тока  $S_I$ , то они уменьшаются с понижением температуры, и для стр. №2 с большим значением критического тока, по сравнению со стр. №1, при одинаковой температуре значения  $S_I$  меньше для стр. №2, чем для стр. №1. Несмотря на это, шум выходного напряжения  $\delta V$  для стр. №2 больше, чем для стр. №1 при температурах выше 50 К. При температуре 10 К ВАХ структуры №1 становится гистерезисной, дифференциальное сопротивление вблизи нуля напряжения увеличивается, и, как следствие, выходной шум увеличивается.

Таблица 2. Характеристики двух широкополосных детекторов при различных температурах

Температура, К	Характеристики детекторов, стр. №1 и стр. №2				
	$r_v$ , В/Вт	$S_I$ (100 Гц), Гц <sup>-1</sup>	шум при 100 Гц, $\delta V$ , В/Гц <sup>1/2</sup>	NEP, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	Динамический диапазон, D, дБ
77	1,7e3 / 5,3e3	7,0e-8 / 1,2e-9	1,26e-8 / 2,68e-8	7,4e-12 / 5,1e-12	33 / 40
70	1,0e4 / -	4,5e-9 / -	1,07e-8 / -	1,1e-12 / -	36 / -
50	8,8e4 / 5,0e4	6,0e-10 / 1,0e-10	5,75e-8 / 7,9e-8	6,5e-13 / 1,6e-12	35 / 36
10	3,0e5 / 1,5e5	- / -	5,01e-7 / 1,67e-7	1,67e-12 / 1,1e-12	31 / 33

Для наглядности зависимость NEP от температуры для двух структур показаны на рис. 5. Видно, что при азотных температурах стр. №2, имеющая высокий критический ток, предпочтительнее в качестве широкополосного детектора. При температуре 50 К стр. №1 имеет высокую чувствительность, низкий выходной шум и, как следствие, малую NEP. При температуре 10 К стр. №1 становится гистерезисной, а высокий выходной шум ухудшает широкополосный приём по сравнению со стр. №2. Кроме того, динамический диапазон мощности для стр. №1 ниже, чем для стр. №2 (Таблица 2).

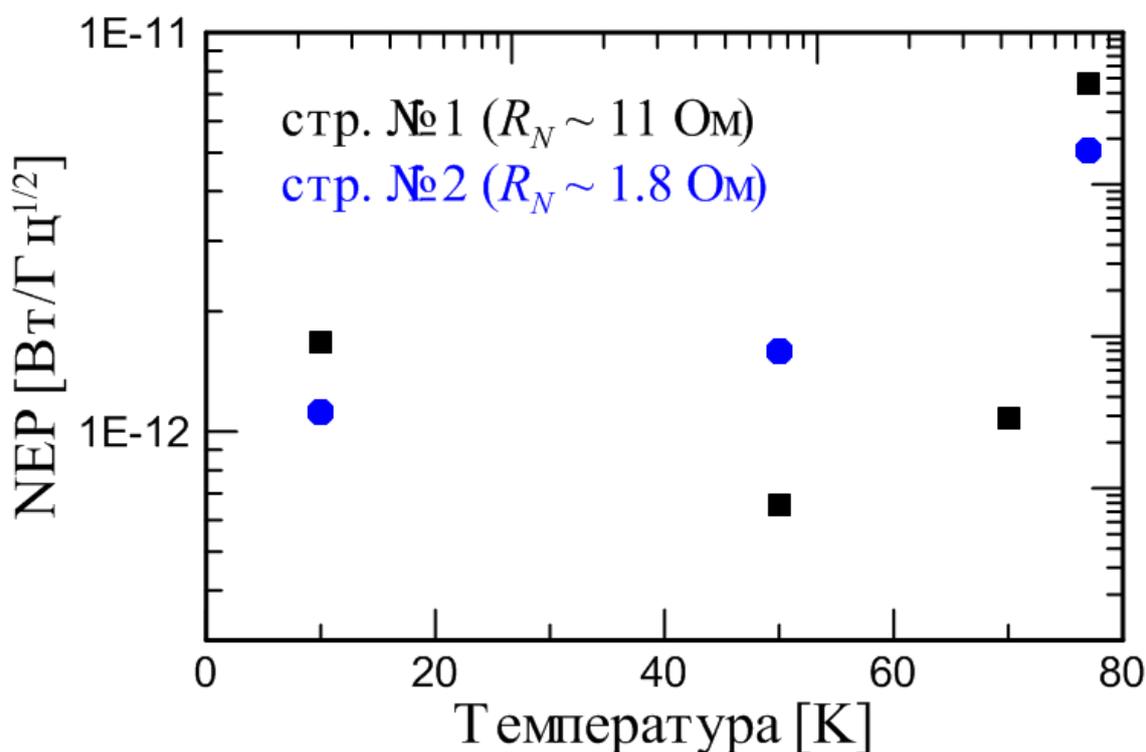


Рис. 5. Экспериментальные значения NEP в зависимости от температуры для двух детекторов

## Заключение

Исследованы сигнальные и шумовые характеристики широкополосных джозефсоновских детекторов на бикристаллической границе. Две структуры, изготовленные по одному техпроцессу и соединенные с логопериодической антенной, были исследованы при рабочих температурах от 10 до 77 К при воздействии внешнего сигнала частотой 165 ГГц. Были получены чувствительность детектора, уровень выходного шума, МЭШ и динамический диапазон мощности. Проведен анализ и сравнение полученных характеристик и

показаны оптимальные диапазоны рабочих температур для использования каждой структуры.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10384).

### Литература

1. An D.Y., Yuan J., Kinev N., et al. Terahertz emission and detection both based on high-Tc superconductors: Towards an integrated receiver. *Applied Physics Letters*. 2013. V.102. P.092601. <https://doi.org/10.1063/1.4794072>
2. Volkov O., Pavlovskiy V., Gundareva I., Khabibullin R., Divin Y. *In Situ* Hilbert-transform spectral analysis of pulsed terahertz radiation of quantum cascade lasers by High-Tc Josephson junctions. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2021. V.11. P.330-338. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.3034815>
3. Masterov D.V., Parafin A.E., Revin L.S., et al. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> long Josephson junctions on bicrystal Zr<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>O<sub>2</sub> substrates fabricated by preliminary topology masks. *Superconductor Science and Technology*. 2017. V.30. P.025007. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/30/2/025007>
4. Glushkov E.I., Chiginev A.V., Kuzmin L.S., Revin L.S. A broadband detector based on series YBCO grain boundary Josephson junctions. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2022. V.13. P.325-333. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.27>
5. Gustafsson D., Lombardi F., Bauch T. Noise properties of nanoscale YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Josephson junctions. *Physical Review B*. 2011. V.84. P.184526. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.184526>
6. Vystavkin A.N., Gubankov V.N., Kuzmin L.S., et al. S-c-S junctions as nonlinear elements of microwave receiving devices. *Revue de Physique Appliquée*. 1974. V.9. P.79. <https://doi.org/10.1051/rphysap:019740090107900>

#### Для цитирования:

Матрозова Е.А., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Ревин Л.С. Влияние параметров YBaCuO джозефсоновского перехода на характеристики широкополосного детектирования. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.4>