

02,13,19

СИНИС-болومتر с микроволновым считыванием

© М.А. Тарасов, С. Махашабе, А.А. Гунбина, Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, С.А. Лемзяков,
Д.В. Нагирная, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, В.С. Эдельман, А.С. Калабухов, Д. Винклер

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 апреля 2020 г.

Разработан, изготовлен и исследован болومتر на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС), интегрированный в двойную щелевую антенну с центральной частотой 90 GHz и соединенный со сверхпроводящим считывающим СВЧ-резонатором. Такая элементарная ячейка предназначена для многоэлементной матрицы высокочувствительного радиоастрономического приемника, в котором считывание большого числа каналов производится по одному коаксиальному кабелю вместо отдельных проводов и отдельных усилителей на каждый канал.

Ключевые слова: болومتر на основе СИНИС-структуры, микроволновое считывание, частотное мультиплексирование, двойная щелевая антенна, копланарный резонатор.

DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49763.17H

1. Введение

Активное развитие радиоастрономии субтерагерцового диапазона частот, охватывающего коротковолновую часть миллиметрового диапазона и субмиллиметрового диапазона длин волн, приводит к повышению требований, предъявляемых к приемным системам, а именно: широкий динамический диапазон и малая мощность, эквивалентная шуму (МЭШ), менее 10^{16} W/Hz^{1/2} для наземных обсерваторий и на три порядка лучше для космических миссий (10^{19} W/Hz^{1/2}). В связи с этим актуальной задачей является снижение собственных шумов таких систем с целью повышения их чувствительности. Одной из весомых компонент шумовых характеристик приемной системой являются шумы, вносимые системой считывания сигналов с болометров. Применяемые ранее системы считывания на полевых транзисторах с собственными шумами на уровне 20 nV/Hz^{1/2} не имеют перспектив применения в современных приемных системах радиоастрономических обсерваторий. Создание микроволновой системы считывания для болометрических структур позволяет уйти от низкочастотного фликкер-шума, а использование криогенного усилителя в непосредственной близости от болометров снижает как шумы усилителя, так и шумы наводок на длинных проводах, чем улучшает помехоустойчивость.

С учетом этого, создание радиоастрономического приемника на основе сверхпроводящего болометра в качестве чувствительного элемента и применение частотного мультиплексирования каналов при подключении болометра к высокочастотному копланарному резонатору является актуальной задачей. Данный метод считывания позволит при необходимости считывать тысячи каналов по одной коаксиальной линии.

В качестве примера практической реализации такого подхода можно привести Simons Observatory [1] с 60000 сверхпроводящими датчиками, проект CCAT-prime [2] с 200000 датчиками, CMB Stage IV [3] с 500000 датчиками. Если предположить, что масса одного усилителя считывания составляет 1 g, то масса на все каналы будет больше 500 kg, при этом в криостат нужно завести миллион проводов, что делает традиционное низкочастотное считывание невозможным даже для наземных систем. Практически все современные сверхпроводниковые многоматричные приемники излучения используют мультиплексирование с частотным разделением каналов. Для количества каналов до 100 можно использовать сравнительно низкочастотные системы терагерцового диапазона со СКВИД-усилителями [4]. Такие системы используются в инструментах POLARBEAR, EBEX, South Pole Telescope. Для большого числа каналов требуется существенно более широкий диапазон частот в несколько гигагерц. Для микроволновых детекторов на кинетической индуктивности (МКИД) созданы и успешно используются системы считывания с частотным разделением каналов. В качестве пионерских реализаций можно привести инструменты MUSIC [5], NIKA [6]. Еще одним примером такой системы является недавняя работа [7], где одновременно считывают 5000 пикселей, находящихся при температуре 250 mK. Сама система считывания подробно описана в [8].

2. СИНИС-болометры с копланарными резонаторами

В настоящей работе описан прототип интегрального приемника на основе болометров структуры сверхпро-

Параметры четырех типов резонаторов

№	Длина копланарного резонатора	Расчетная частота резонанса
1	4800 μm	6 GHz
2	6800 μm	4.2 GHz
3	8800 μm	3.2 GHz
4	13800 μm	2 GHz

водник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) с микроволновой системой считывания сигнала на частотах до 10 GHz и криогенным усилителем (4 К) на основе транзистора с высокой подвижностью электронов (англ. НЕМТ — high electron mobility transistor) и шумовой температурой 1 К. Достоинствами СИНИС-болометров являются широкий динамический диапазон, МЭШ не хуже $10^{16} \text{ W/Hz}^{1/2}$, высокая вольт-ваттная чувствительность (до 10^9 V/W) и высокое быстродействие (менее микросекунды). Мы объединили СИНИС-болометр со сверхпроводящим резонатором считывания. Аналогичный подход был реализован в работах [9,10] с СИНИС-болометром с большим объемом абсорбера, около $5 \mu\text{m}^3$. Дизайн копланарного резонатора и двойной щелевой антенны аналогичен [11], оптимизированному для низкоомного сверхпроводящего болометра на краю резистивного перехода. В нашем случае для более высокоомного СИНИС-болометра топология копланарных линий оптимизирована численным моделированием для согласования импедансов. Первая партия образцов была изготовлена по традиционной технологии теневого напыления с висячим мостиком из резиста и длиной копланарного резонатора 4.8 mm.

Вторая партия образцов изготовлена по безмостиковой технологии и включала четыре типа с разной длиной копланарного резонатора и расчетными частотами от 2 до 6 GHz (таблица).

3. Топология и технология изготовления

Основу дизайна составляет одиночный болометр, интегрированный в двойную щелевую антенну с центральной частотой 90 GHz. Выбор центральной частоты 90 GHz обусловлен тем, что первой испытательной площадкой для разработанных структур предполагается наземный Большой телескоп азимутальный (БТА) [12], а прозрачность атмосферы выше 100 GHz в этом случае значительно хуже. Полученные результаты будут использованы для разработки прототипа приёмной системы для строящегося телескопа на плато Суффа [13] и в перспективе для отечественной космической обсерватории МИЛЛИМЕТРОН [14]. Результаты, полученные в ходе данного проекта, могут быть применимы и для других перспективных разработок, а именно: системы считывания для болометрических матриц других ти-

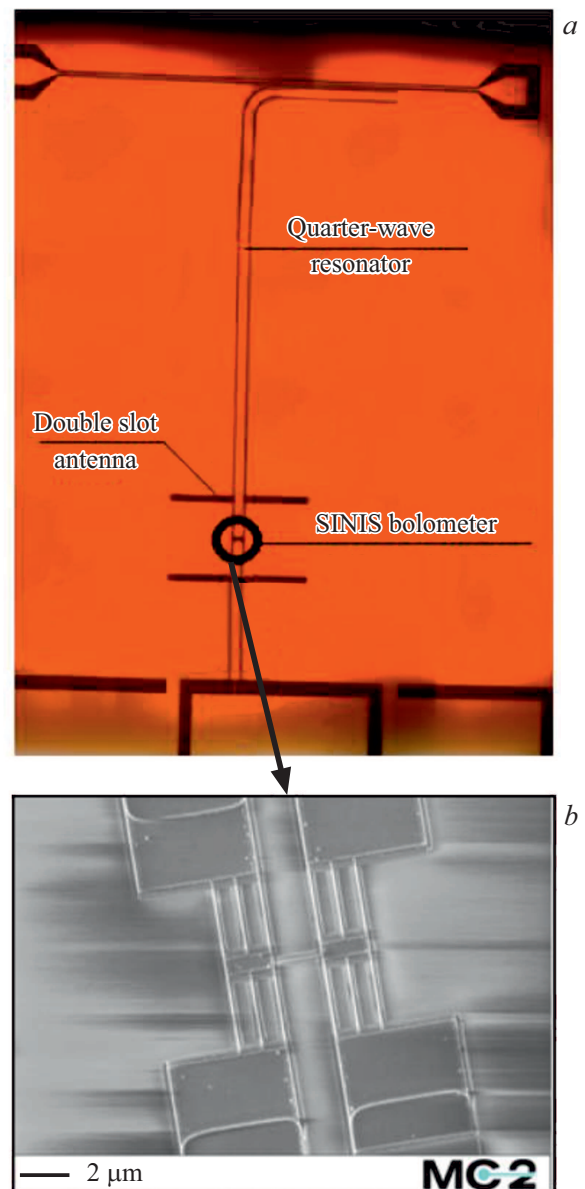


Рис. 1. а) Фотография общего вида изготовленного образца в оптическом микроскопе и б) изображение в электронном микроскопе болометрической структуры, изготовленной по технологии безмостикового теневого напыления.

пов (например, для TES и KID), СКВИД-структуры для квантово-информационных технологий, развиваемые технологии для изготовления различных микро- и наноструктур.

Планарная двойная щелевая антенна имеет хорошие характеристики направленности в сочетании с квазиоптическим рупором или диэлектрической линзой. Антенна (рис. 1) имеет две параллельные щели в нижнем слое нитрида ниобия. Эти щели когерентно возбуждаются короткими отрезками копланарных линий с СИНИС-болометром в центре. Одна секция копланарной линии проходит параллельно щели в длинной сверхпроводящей секции, которая функционирует как

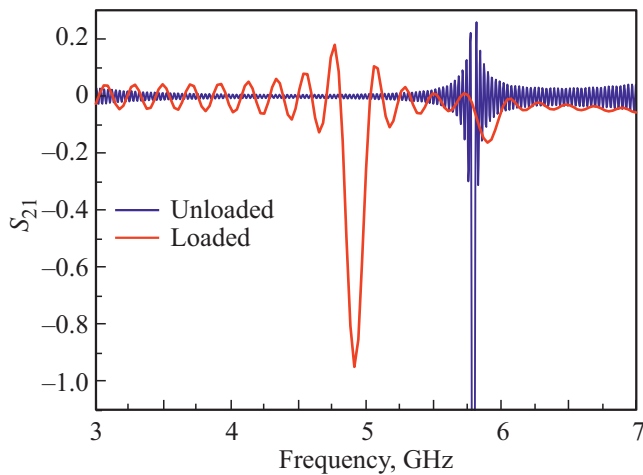


Рис. 2. Резонанс копланарного четвертьволнового резонатора без болометра, $Q = 232$, $f = 5.8$ GHz, и $Q = 33$, $f = 4.95$ GHz с болометром.

четвертьволновый резонатор. Этот резонатор закорочен на дальнем конце, а разомкнутый конец замыкается СИНИС-болометром в антенне. Резонанс копланарного четвертьволнового резонатора без болометра $Q = 232$, $f = 5.8$ GHz и $Q = 33$, $f = 4.95$ GHz с болометром (рис. 2).

Сопротивление нормального металлического абсорбера СИНИС-болометра соответствует реальной части импеданса антенны, в которую он интегрирован. Ток смещения соответствует рабочей точке с максимальной чувствительностью.

Резонатор был изготовлен из слоя NbN толщиной 50 nm с расчетной кинетической индуктивностью 4 pH на квадрат. Это позволяет значительно уменьшить геометрическую длину резонатора. Первый слой содержит резонатор, двойную щелевую антенну, выходной резонатор, контактные площадки и соединительные проводники. Пленка NbN травилась в ионной плазме Cl_2/Ar . Болометры были сформированы во втором слое с помощью двухслойной резистивной маски с последующим напылением под углами сверхпроводящих электродов из Al. Нормальный металл представляет собой Al толщиной 20 nm, сверхпроводимость которого подавлена лежащей ниже пленкой Fe толщиной 1 nm, барьер был сформирован во время окисления этого слоя Fe/Al.

Параллельно с традиционной технологией, в данной работе продолжено развитие технологии изготовления субмикронных СИН- и СИС-переходов в маске резиста без подвешенных мостиков Долана (фотография болометра, изготовленного по такой технологии — рис. 1, b). Такая технология [15] имеет много преимуществ по сравнению с применяемой ранее, а именно: возможность изготовления туннельных переходов площадью от 0.01 до $1000 \mu m^2$, улучшение точности воспроизведения размеров, улучшение электропроводности и теплопровод-

ности подводящих проводников, а также возможность проводить ионную чистку подложки перед напылением. Схематичное изображение этапов новой разработанной технологии представлена на рис. 3. Суть технологии заключается в отдельном напылении двух пленок разных металлов в две ортогональные глубокие канавки в двухслойном резисте (рис. 3, a и b). Напыление первой пленки вдоль первой канавки не приводит к ее напылению в ортогональную канавку (рис. 3, c), т.к. угол напыления выбран таким образом, что в направлении второй канавки напыление происходит на стенку из резиста с последующим удалением в ремувере. Аналогично и при напылении другой пленки во вторую ортогональную канавку, после поворота подложки на 90° (рис. 3, d). Изолятор был получен путем окисления первой пленки в напылительной камере (10 Torr, 10 min). Применение отдельной экспозиции для двух слоев резиста позволяет точно контролировать профиль канавок и избежать образования вертикальных металлических стенок после напыления пленок.

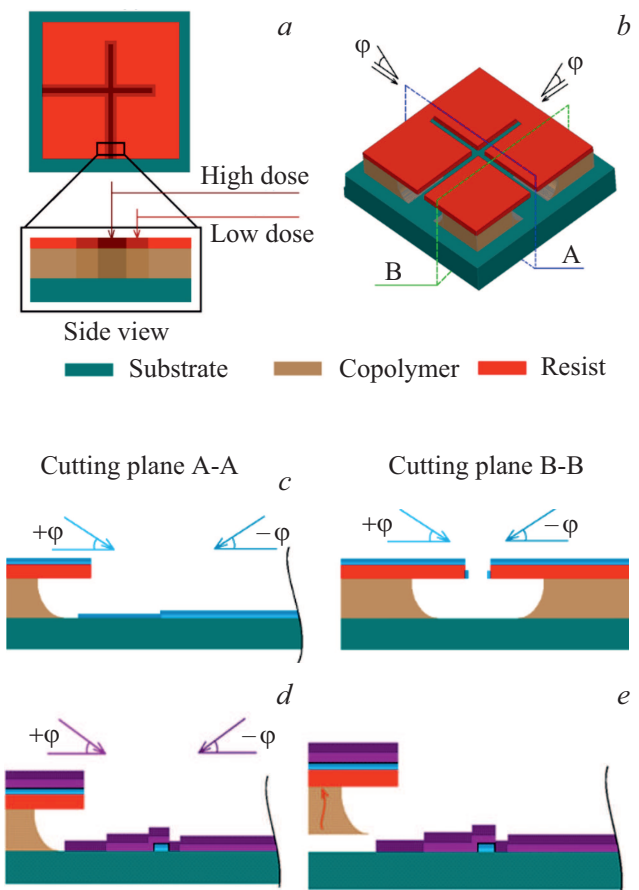


Рис. 3. Схематичное изображение этапов разработанной технологии изготовления туннельных переходов: a) экспонируемая структура до проявления; b) экспонируемая структура после проявления; c) напыление первой пленки под углами $\pm 45^\circ$; d) напыление второй пленки в ортогональную канавку; e) удаление резиста в ремувере.

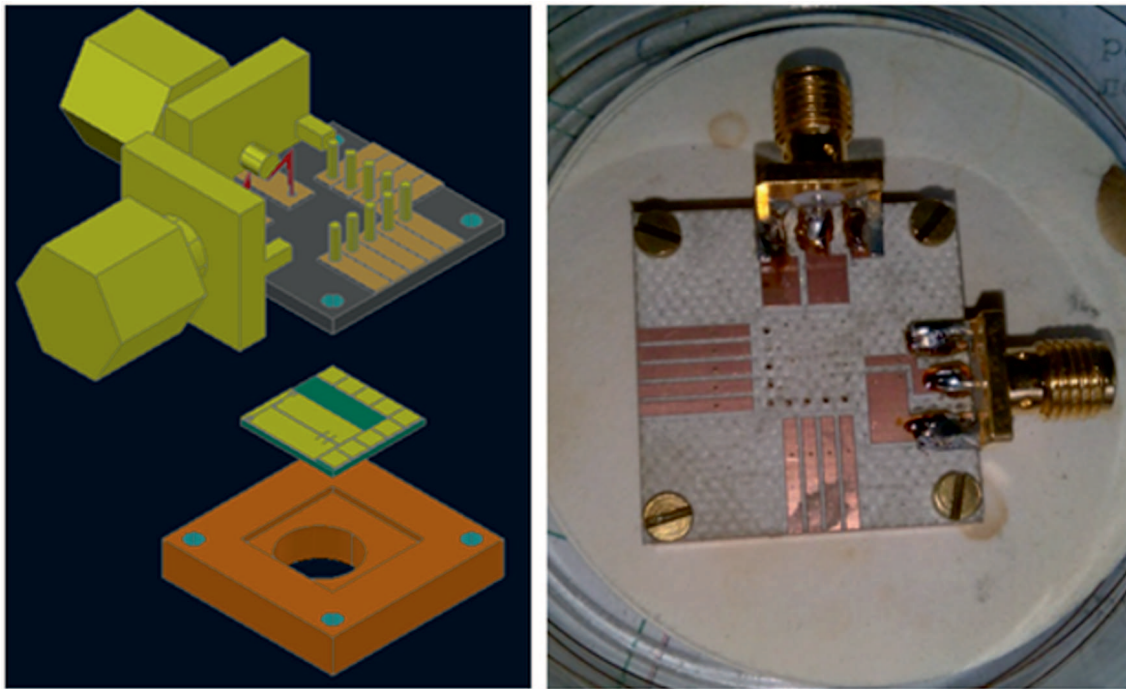


Рис. 4. Держатель образца с SMA-разъемами.

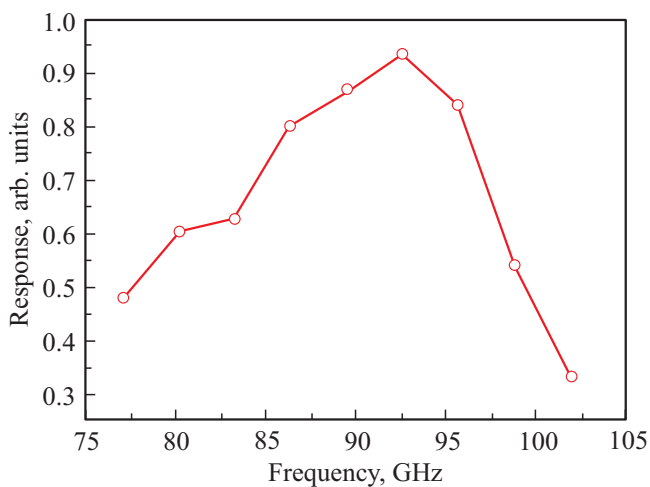


Рис. 5. Спектральный отклик болометра на излучение ЛОВ.

4. Экспериментальная установка и результаты измерений

Измерения вольт-амперных характеристик проводились в криостате фирмы Oxford Instruments Heliox AC-V при температуре 300 мК. Фотография и схематичное изображение держателя образца, разработанного для таких измерений, приведены на рис. 4. Также был измерен спектральный отклик исследуемого образца с использованием перестраиваемой лампы обратной волны (ЛОВ) в диапазоне 75–100 GHz (рис. 5). Мощность

излучения нормировалась на сигнал опорного канала с пьезоэлектрическим приемником. Для более точной оценки спектрального отклика разработанных структур применяется дополнительная нормировка принятого сигнала на опорный сигнал (сигнал, снимаемый с рутениевого резистора, расположенного внутри криостата рядом с исследуемым образцом) и на сигнал с цепочки СИН-структур (термометра). Такая калибровка позволяет частично „исключить“ множественные переотражения внутри криостата и нагрев подложки. Особенности такой методики калибровки подробно изложены в нашей работе [16].

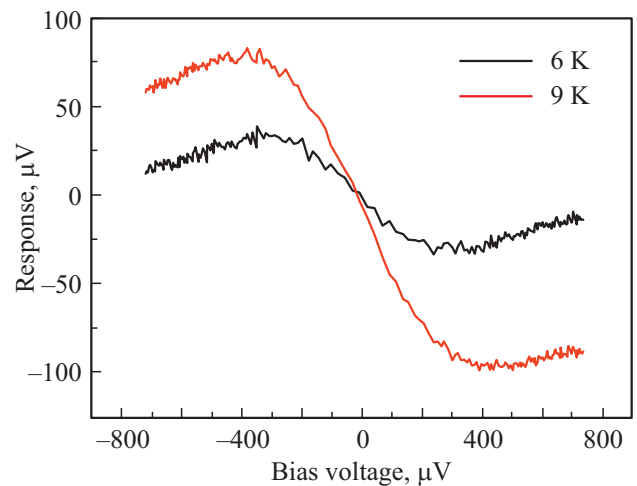


Рис. 6. Отклик на излучение черного тела при температурах 6 и 9 К.

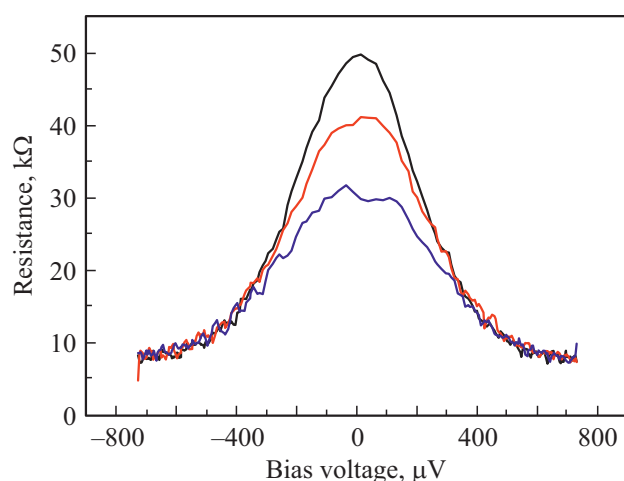


Рис. 7. Дифференциальное сопротивление при трех значениях мощности сигнала.

Мы также измерили отклик образца на излучение черного тела при температурах 6 и 9 К (рис. 6) в погружном криостате растворения при температуре 100 мК [17]. Соответствующий максимум дифференциального сопротивления изменяется от 50 до 30 кΩ. Экспериментальные значения дифференциального сопротивления при трех уровнях мощности излучения приведены на рис. 7. Для копланарной линии с сопротивлением 50 Ω такая нагрузка соответствует добротности 1000 и 300 для темновых и облучаемых случаев соответственно. Изменение импеданса с 30 до 50 кΩ легко регистрируется по изменению резонансной частоты и добротности и позволяет проводить СВЧ-считывание с частотным разделением каналов.

5. Заключение

Был разработан, изготовлен и экспериментально исследован СИНИС-болومتر, предназначенный для использования с микроволновой системой считывания. Измерен спектральный отклик на частоте сигнала в диапазоне 90 GHz. Измерен электрический отклик и дифференциальное сопротивление такого болометра на излучение черного тела при температурах 6 и 9 К. Дифференциальное сопротивление при этом изменяется от 50 до 30 кΩ, что соответствует изменению добротности от 1000 до 300.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН (№ 0030-2019-0003) и государственного задания ИПФ РАН (№ 0035-2019-0005). Изготовление и исследование образцов произведено с использованием уникальной научной установки (УНУ № 352529).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Galitzki, A. Ali, K. Arnold, P. Ashton, J. Ausermann, C. Baccigalupi, T. Baidon, D. Barron, J. Beall, S. Beckman. *Proc. SPIE* **10708**, 1070804 (2018).
- [2] M. Aravena, J. Ausermann, K. Basu, N. Battaglia, B. Beringue, F. Bertoldi, J.R. Bond, P. Breyse, P. Bustos, S. Chapman, S. Choi, D. Chung, N. Cothard, B. Dober, C. Duell, S. Duff, R. Dunner, J. Erler, M. Fich, L. Fissel, S. Foreman, P. Gallardo, J. Gao, R. Giovanelli, U. Graf, M. Haynes, T. Herter, G. Hilton, R. Hlozek, J. Hubmayr, D. Johnstone, L. Keating, E. Komatsu, B. Magnelli, P. Mauskopf, J. McMahon, P.D. Meerburg, J. Meyers, N. Murray, M. Niemack, T. Nikola, M. Nolta, S. Parshley, R. Puddu, D. Riechers, E. Rosolowsky, S. Simon, G. Stacey, J. Stevens, J. Stutzki, A. Van Engelen, E. Vavagiakis, M. Viero, M. Vissers, S. Walker, B. Zou. *arXiv:1909.02587* (2019).
- [3] M. Abitbol, Z. Ahmed, D. Barron, R. Thakur, A. Bender, B. Benson, C. Bischoff, S. Bryan, J. Carlstrom, C. Chang. *arXiv:1706.02464* (2017).
- [4] T. Lanting, H.-M. Cho, J. Clarke, M. Dobbs, A. Lee, Lueker, P. Richards, A. Smith, and H. Spieler. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **520**, 548 (2004).
- [5] J. Schlaerth, A. Vayonakis, P. Day, J. Glenn, J. Gao, S. Glowala, S. Kumar, H. LeDuc, B. Mazin, J. Vaillancourt, J. Zmuidzinas. *J. Low Temp. Phys.* **151**, 684 (2008).
- [6] M. Calvo, A. Benoit, A. Catalano, J. Goupy, A. Monfardini, N. Ponthieu, E. Barria, G. Bres, M. Grollier, G. Garde. *J. Low Temp. Phys.* **184**, 816 (2016).
- [7] L. Ferrari, O. Yurduseven, N. Llombart, S. Yates, J. Bueno, V. Murugesan, D. Thoen, A. Endo, A. Baryshev, J. Baselmans. *IEEE TST* **8**, 127 (2017).
- [8] J.J.A. Baselmans, J. Bueno, S.J.C. Yates, O. Yurduseven, N. Llombart, K. Karatsu, A.M. Baryshev, L. Ferrari, A. Endo, D.J. Thoen, P.J. de Visser, R.M.J. Janssen, V. Murugesan, E.F.C. Driessen, G. Coiffard, J. Martin-Pintado, P. Hargrave, M. Griffin. *Astron. Astrophys.* **601**, A89 (2017).
- [9] D.R. Schmidt, K.W. Lehnert, A.M. Clark, W.D. Duncan, K.D. Irwin, N. Miller, J.N. Ullom. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 053505 (2005).
- [10] D.R. Schmidt, W.D. Duncan, K.D. Irwin, K.W. Lehnert, N.A. Miller, J.N. Ullom. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **559**, 516 (2006).
- [11] S.V. Shitov, A.A. Kuzmin, M. Merker, V.I. Chichkov, A.V. Merenkov, A.B. Ermakov, A.V. Ustinov, M. Siegel. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27**, 2100805 (2017).
- [12] <http://w0.sao.ru/hq/sekbt/>.
- [13] <http://www.ipme.ru/ipme/labs/RT-70/source/start.html>
- [14] <http://www.asc.rssi.ru/millimetron/millim.htm>.
- [15] М. Тарасов, А. Гунбина, Д. Нагирная, М. Фоминский. Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами. Заявка на патент № 2019123125 от 22.07.2019.
- [16] M.A. Tarasov, A.M. Chekushkin, R.A. Yusupov, A.A. Gunbina, V.S. Edelman. *J. Commun. Technol. Electron.* **65**, 1, 60 (2020).
- [17] V.S. Edelman. *Instrum. Exp. Techn.* **52**, 2, 301 (2009).

Редактор Е.В. Толстякова