

15.1;05.5;11.4

**Сверхпроводящий источник шума для сверхнизких температур**© Т.М. Ким<sup>1</sup>, С.В. Шитов<sup>1,2,¶</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: kim.tatyana.mail@gmail.com

¶ E-mail: sergey3e@gmail.com

Поступило в Редакцию 1 июня 2021 г.

В окончательной редакции 21 июля 2021 г.

Принято к публикации 12 сентября 2021 г.

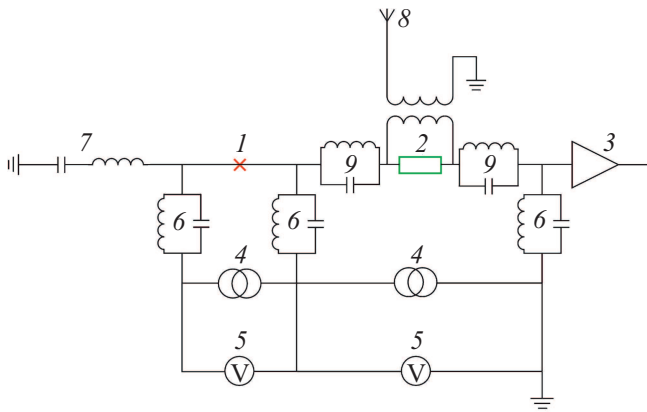
Сверхпроводящий источник шума работает при температурах  $< 300$  мК и содержит микромостик из гафния и сверхпроводящий туннельный переход из алюминия, включенные в общий копланарный волновод. Микромостик согласован с планарной антенной и реализует функцию оптического черного тела на частотах 600–700 GHz. Копланарная линия является выходом черного тела в диапазоне 1–2 GHz. Температура микромостика устанавливается в диапазоне 0.4–9 К и калибруется с использованием дробового шума туннельного перехода. Модуляция температуры каждого из источников контролируется независимо с помощью постоянного тока посредством перевода из сверхпроводящего в нормальное состояние с характерными временами  $< 0.1$  ms и тепловыделением  $\sim 1$   $\mu$ W.

**Ключевые слова:** сверхпроводящий микромостик, сверхпроводящий туннельный переход, термодинамический шум, дробовой шум, шумовая термометрия.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897

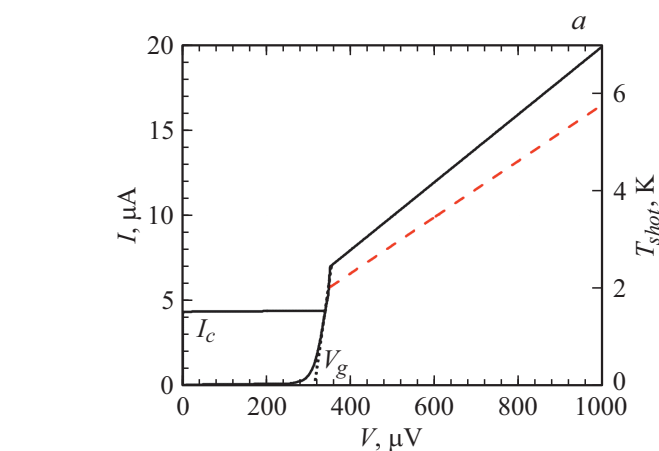
Шумовые измерения при сверхнизких температурах (30–300 мК) необходимы для калибровки сверхчувствительных тепловых детекторов для исследований космоса в терагерцевом (THz) диапазоне [1] и усилителей в цепях квантовой обработки информации в гигагерцевом (GHz) диапазоне [2]. Существующие методы чернотельного излучателя (ЧТИ) используют постоянный [3] или импульсный [4] нагрев ЧТИ мощностью  $\sim 1$  мW, что может быть критичным для рефрижератора растворения с мощностью охлаждения  $\sim 100$   $\mu$ W. В работе [5] ЧТИ [4] охарактеризован как структурный аналог композитного болометра размером  $\sim 10 \times 10$  mm массой  $\sim 0.1$  g, в котором импульсы напряжения  $\sim 10$  V вызывают нагрев пленочного поглотителя с фронтом  $\sim 1$  ns. Это позволяет калибровать чувствительность и скорость реакции изображающих матриц [5]. Однако эффективное время цикла нагрев–охлаждение такого источника составляет  $\tau \sim 2$  s, что затрудняет реализацию радиометра с частотами модуляции  $f_m > 1$  Hz: при  $f_m \sim 10$  Hz температурная амплитуда ЧТИ снижается  $\sim (\tau f_m)^{-1}$ . В настоящей работе анализируются электрофизическая модель и конструкция интегральной схемы шумового калибратора, преимуществами которого являются малая тепловая мощность ( $\sim 1$   $\mu$ W) и короткое время тепловой релаксации ( $\tau < 0.1$  ms). Предлагаемый нами ЧТИ также напоминает болометр, но в его основе лежат резистивный микромостик и планарная THz-антенна. Диапазон шумовых температур калибратора 0.4–9 К оптимален для исследования THz-детекторов, работающих в условиях космического фона с температурой  $T_{bg} \approx 2.7$  К. Физическую температуру  $T$  пленочного резистора можно задавать либо нагревом подложки, либо

током, разогревающим пленку относительно подложки. Первый способ реализован в ЧТИ [4], второй требует определения локальной температуры пленки, что невозможно ни при использовании стандартных криогенных термометров [6], ни при использовании интегральных структур типа [4]. Предлагается определять температуру микрорезистора, сравнив его шум на GHz-частотах с дробовым шумом туннельного перехода типа SIS (superconductor–insulator–superconductor) [7,8], и использовать ее для вычисления термодинамического шума на THz-частотах, что является развитием методов шумовой термометрии [9]. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 1. Два источника шума включены последовательно в общую электрическую цепь на одном чипе. К выходу чипа подключается референсный измеритель мощности — охлаждаемый детектор или малошумящий охлаждаемый усилитель в радиометрическом режиме с мгновенной полосой 1 GHz и шумовой температурой  $\sim 10$  К. Сверхпроводящее и резистивное состояния микромостика и SIS-перехода позволяют: 1) выключить любой из них, переводя в сверхпроводящее состояние; 2) передать без потерь сигнал от выбранного источника; 3) управлять независимо уровнем шума с помощью тока смещения в широком диапазоне частот (до  $\sim 100$  kHz); 4) использовать критические температуры материалов как референсные параметры. Мощность шума  $P_n$  идеального резистора может быть описана формулой Планка в неограниченном диапазоне частот  $\Delta f$ . В пределе низких частот или больших температур ( $hf \ll k_B T$ , где  $h$  — постоянная Планка,  $f$  — частота,  $k_B$  — константа Больцмана) мощность шума, переданная в нагрузку,  $P_n = k_B T \Delta f$ .



**Рис. 1.** Принципиальная схема устройства. 1 — SIS-переход, 2 — сверхпроводящий микромостик, 3 — референсный измеритель мощности, 4 — источники тока, 5 — измерители напряжения, 6 — полосно-заграждающие фильтры диапазона 1–2 GHz, 7 — полосно-пропускающий фильтр 1–2 GHz, 8 — двухщелевая THz-антенна, 9 — полосно-заграждающие фильтры антенны 600–700 GHz.

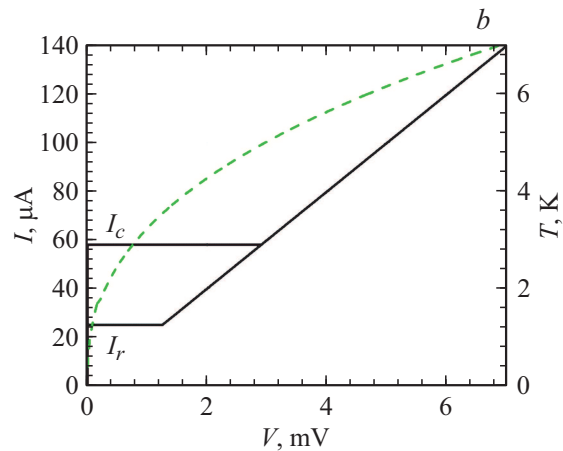
При условии  $eV \gg k_B T \gg hf$  (где  $e$  — заряд электрона,  $V$  — напряжение) в SIS-переходе доминирует дробовой шум, который определяется током  $I$ . Квадрат напряжения дробового шума  $\langle V_{shot}^2 \rangle = 2eIR_n^2\Delta f$ , где  $R_n$  — нормальное сопротивление, откуда согласованная мощность  $P_{shot} = eIR_n\Delta f/2$ . Эквивалентная температура дробового шума  $T_{shot} = P_{shot}/2k_B\Delta f$  пропорциональна  $I$  на линейном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 2, *a*), минимальное значение  $T_{shot\ min} = eV_g/2k_B$ . Для SIS-перехода из алюминия  $V_g = 340\text{--}360\ \mu\text{V}$ , тепловыделение  $\sim 2\ \text{nW}$  и  $T_{shot\ min} \approx 2\ \text{K}$ . Частотный диапазон  $\Delta f_{SIS}$  дробового шума SIS-перехода площадью  $10\ \mu\text{m}^2$  не превышает 50 GHz и определяется условием  $2\pi\Delta f_{SIS}R_nC_{SIS} < 1$ , где  $C_{SIS}$  — емкость SIS-перехода.



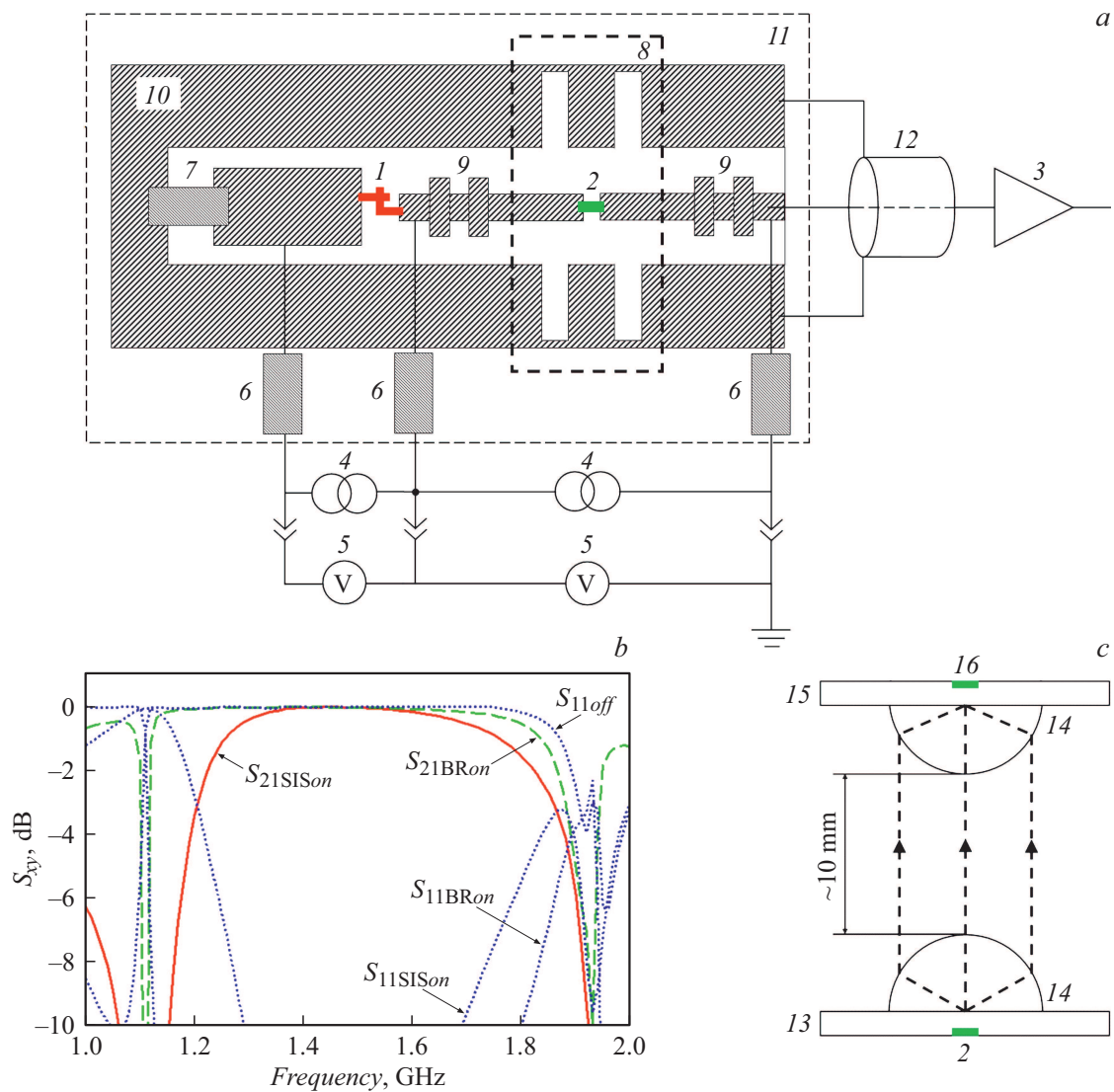
Кроме прямого сравнения шумов можно использовать метод теплового гистерезиса ВАХ микромостика [10] (рис. 2, *b*). Превышение критического тока  $I_c$  приводит к скачку напряжения, и микромостик становится резистором с сопротивлением  $R_n$ , разогретым до температуры  $T$ , которая заведомо превышает температуру подложки  $T_0$ . Обратный переход в сверхпроводящее состояние реализуется при токе возврата  $I_r < I_c$ , при этом  $T$  снижается до критического значения  $T_c$ , а разогрев — до  $P_r = I_r^2 R_n$ . При  $T < 1\ \text{K}$  необходимо учитывать эффект электронного газа [11] и в качестве флуктуационной температуры использовать электронную температуру  $T_e$ , которую можно найти, решив уравнение постоянного потока тепла через электрон-фононный и фонон-фононный интерфейсы

$$P_{e-ph}(T) = \Sigma v(T_e^n - T_k^n) = \frac{S}{A}(T_k^4 - T_0^4), \quad (1)$$

где  $T_k$  — температура решетки,  $\Sigma$  — константа электрон-фононного взаимодействия материала,  $v$  — объем мостика,  $n = 5\text{--}6$ ,  $A$  — константа Капицы [12],  $S$  — площадь теплового контакта пленки с подложкой. Правая часть уравнения (1) отражает разогрев фононной системы пленки относительно фононной системы подложки; при температурах выше 1 K  $T_k - T_0 \gg T_e - T_k$ . Степень  $n$  можно уточнить, измеряя тепловую мощность в самой нижней точке резистивной ветви ВАХ, где  $P_{e-ph}(T) = I_r(T_0)^2 R_n$ . В этой точке рассчитанный шум микромостика должен соответствовать дробовому шуму:  $T_e \approx T_{shot}$ . Спектр шума мостика с электронным газом можно считать термодинамическим до частот, ограниченных эффективностью андреевских зеркал [13] на границе мостик–сверхпроводящие электроды из ниобия, т. е. до  $\sim 750\ \text{GHz}$ . ЧТИ предназначен для использования в двух частотных диапазонах (1–2 и 600–700 GHz)



**Рис. 2.** Характеристики источников шума. *a* — ВАХ туннельного перехода типа SIS (сплошная линия) и шумовая температура  $T_{shot}$ , рассчитанная выше щелевого напряжения  $V_g$  (штриховая линия); *b* — гистерезисная ВАХ сверхпроводящего микромостика (сплошная линия) и физическая температура  $T$ , рассчитанная с учетом сильной температурной зависимости теплоотвода (штриховая линия).



**Рис. 3.** Конструкция устройства. *a* — упрощенная топология чипа и внешние цепи; области металлизации чипа заштрихованы. 1–9 — то же, что на рис. 1, 10 — копланарный волновод, 11 — диэлектрическая подложка, 12 — коаксиальный кабель. *b* — рассчитанные [14] параметры экспериментального чипа: коэффициент передачи сигнала с SIS-перехода ( $S_{21SISon}$ ), коэффициент передачи с микромуфта ( $S_{21BRon}$ ), коэффициент отражения чипа при выключенных ( $S_{11off}$ ) и включенных ( $S_{11SISon}$ ,  $S_{11BRon}$ ) источниках. *c* — схема передачи сигнала ЧТИ с применением коллимирующей иммерсионной оптики для проекта [1]: референсный усилитель 3 подключается к чипу 13, на котором расположен излучатель 2; линза 14 формирует коллимированный пучок, который поступает через аналогичную линзу на чип 15, где расположен тестируемый детектор 16.

для продолжения проектов [1,15]. Диапазон температур микромуфта ограничен критическими температурами гафния и ниобия:  $T_{cHf} \approx 0.4$  К и  $T_{cNb} \approx 9$  К. Упрощенная топология чипа представлена на рис. 3, *a*: SIS-переход и микромуфта включены в общую копланарную линию из ниобия на сапфировой подложке. Микромуфта согласован одновременно с двухщелевой THz-антенной [1,15,16] и референсным усилителем, подключенным через копланарный волновод в диапазоне 1–2 GHz. Полосно-заграждающие фильтры антенны предотвращают утечку сигнала в диапазоне 600–700 GHz и прозрачны в диапазоне 1–2 GHz. Источники тока и измерители напряжения подключены через полосно-заграждающие

фильтры 1–2 GHz. Электродинамический расчет чипа в среде Cadence AWR [14] подтвердил реализуемость предложенного устройства в диапазоне 1–2 GHz (рис. 3, *b*). Чип помещается на плоскую поверхность эллиптической иммерсионной линзы (рис. 3, *c*) так, что антенна находится в ее фокусе, а тестируемый детектор [15], снабженный аналогичной линзовой антенной (ЛА), расположен на удалении  $\sim 10$  mm в ближней зоне, где фронт излучения плоский. Такая система ЛА с типичным коэффициентом направленности  $> 20$  dB не требует промежуточной оптики и обеспечивает высокую помехозащищенность: ослабление внеосевых пучков составит  $> 16$  dB. Потери сигнала определяются дифрак-

ционными рассеянием на апертуре ЛА и не превышают 1 dB ( $\sim 20\%$ ). Термодинамический фон криостата 0.3 K характеризуется границей планковского спектра в районе 10 GHz, что позволяет пренебречь фотонной нагрузкой ТГц-детектора. Микрорезистор  $50 \Omega$  размером  $2 \times 2 \times 0.05 \mu\text{m}$  с теплопроводностью  $G = 10^{-9} \text{ W/K}$  разогревается до  $T = 9 \text{ K}$  мощностью  $3 \mu\text{W}$  при смещении 13 mV; при температуре калибровки 2 K мощность резко падает и составляет 2 nW при напряжении 0.3 mV. Оценить паразитный нагрев  $\Delta T$  подложки из сапфира с удельной теплопроводностью  $G_s = 10^{-2} \text{ W/(K} \cdot \text{m)}$  при  $T_0 = 100 \text{ mK}$  [17] можно с помощью упрощенной модели распространения тепла в виде изотермической полусферы диаметром  $D$ . Соотношение  $\Delta T(D) = P/G_s \pi D$  является результатом интегрирования градиента температуры между источником диаметра  $D$  с мощностью  $P$  и бесконечно удаленной изотермической полусферой  $T_0$ . Если расположить SIS-переход на расстоянии 2 mm от мостика, то рассчитанное в этой точке  $\Delta T < 10 \text{ mK}$ , и таким нагревом SIS-перехода можно пренебречь. Проведенные оценки показывают, что предлагаемый генератор шума не перегрузит криостат растворения и в принципе может быть интегрирован в составе микросхемы с практическим болометром и/или усилителем. Эксперимент по модуляции в проекте [15] позволил оценить время температурной релаксации микромостика из гафния  $< 10 \mu\text{s}$ , что определяется временем электрон-фононной релаксации. Использование электронного газа в качестве термодинамической среды [18] открывает качественно новые возможности в прецизионных измерениях сверхмалощумящих устройств.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-37-90094, а также Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИТУ МИСиС в части материаловедения — грант НИТУ МИСиС № K2-2020-016.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A.V. Merenkov, V.I. Chichkov, A.B. Ermakov, A.V. Ustinov, S.V. Shitov, IEEE Trans. Appl. Supercond., **28** (7), 1 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2827981
- [2] B.H. Eom, P.K. Day, H.G. LeDuc, J. Zmuidzinas, Nature Phys., **8**, 623 (2012). DOI: 10.1038/nphys2356
- [3] A.V. Uvarov, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin, Meas. Techn., **53** (9), 1047 (2010). DOI: 10.1007/s11018-010-9617-4
- [4] Ph. Abbon, A. Delbart, M. Fesquet, C. Magneville, B. Mazeau, J.-P. Pansart, D. Yvon, L. Dumoulin, S. Marnieros, Ph. Camus, T. Durand, Ch. Hoffmann, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **575** (3), 412 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.02.094
- [5] S. Masi, P. de Bernardis, A. Paiella, F. Piacentini, L. Lamagna, A. Coppolecchia, P.A.R. Ade, E.S. Battistelli, M.G. Castellano, I. Colantoni, F. Columbro, G. D'Alessandro, M. De Petris, S. Gordon, C. Magneville, P. Mauskopf, G. Pettinari, G. Pisano, G. Polenta, G. Presta, E. Tommasi, C. Tucker, V. Vdovin, A. Volpe, D. Yvon, J. Cosmol. Astropart. Phys., **2019** (7), 003 (2019). DOI: 10.1088/1475-7516/2019/07/003
- [6] <https://www.lakeshore.com/products/categories/temperature-products/cryogenic-temperature-sensors>
- [7] V.Yu. Belitsky, V.P. Koshelets, I.L. Serpuchenko, M.A. Tarasov, L.V. Filippenko, S.V. Shitov, in *Proc. of the 20th Eur. Microwave Conf.* (IEEE, 1990), vol. 1, p. 816. DOI: 10.1109/EUMA.1990.336144
- [8] H. Inoue, T. Noguchi, K. Kohno, J. Phys.: Conf. Ser., **234**, 042014 (2010). DOI: 10.1088/1742-6596/234/4/042014
- [9] L. Spietz, R.J. Schoelkopf, P. Pari, Appl. Phys. Lett., **89** (18), 183123 (2006). DOI: 10.1063/1.2382736
- [10] B.S. Karasik, S.V. Pereverzev, D. Olaya, J. Wei, M.E. Gershenson, A.V. Sergeev, IEEE Trans. Appl. Supercond., **19** (3), 532 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2019426
- [11] F.C. Wellstood, C. Urbina, J. Clarke, Phys. Rev. B, **49** (9), 5942 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevB.49.5942
- [12] G.L. Pollack, Rev. Mod. Phys., **41** (1), 48 (1969). DOI: 10.1103/RevModPhys.41.48
- [13] D. Chouvaev, L. Kuzmin, M. Tarasov, Supercond. Sci. Technol., **12** (11), 985 (1999). DOI: 10.1088/0953-2048/12/11/386
- [14] Cadence AWR [Электронный ресурс]. URL: <https://www.awr.com/awr-software/products/awr-design-environment>
- [15] А.В. Меренков, С.В. Шитов, В.И. Чичков, А.Б. Ермаков, Т.М. Ким, А.В. Устинов, Письма в ЖТФ, **44** (13), 59 (2018). DOI: 10.21883/PJTFF.2018.13.46328.17149 [A.V. Merenkov, S.V. Shitov, V.I. Chichkov, A.B. Ermakov, T.M. Kim, A.V. Ustinov, Tech. Phys. Lett., **44** (7), 581 (2018). DOI: 10.1134/S106378501807012X].
- [16] С.В. Шитов, Письма в ЖТФ, **37** (19), 88 (2011). [S.V. Shitov, Tech. Phys. Lett., **37** (10), 932 (2011). DOI: 10.1134/S1063785011100117].
- [17] A.L. Woodcraft, M. Barucci, P.R. Hastings, L. Lolli, V. Martelli, L. Risegari, G. Ventura, Cryogenics, **49** (5), 159 (2009). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2008.10.024
- [18] B.S. Karasik, C.B. McKitterick, T.J. Reck, D.E. Prober, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **5** (1), 16 (2015). DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2370755