

02,09

## Линзовая щелевая антенна на основе тонких пленок Nb для джозефсоновского широкополосного генератора ТГц-диапазона

© Н.В. Кинев<sup>1</sup>, К.И. Рудаков<sup>1,2,3</sup>, А.М. Барышев<sup>3</sup>, В.П. Кошелец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>3</sup> Университет Гронингена, Гронинген, Нидерланды

E-mail: nickolay@hitech.cplire.ru

Генератор на основе распределенного туннельного СИС-перехода (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник) обладает сверхширокой рабочей полосой — до 100% от центральной частоты, и представляется перспективным типом направленного источника непрерывного электромагнитного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Предложена схема ТГц-генератора, в которой генератор интегрирован на одной микросхеме с передающей линзовой антенной на основе щелевой структуры в пленке Nb толщиной 200 nm и излучает сигнал в открытое пространство. Предложены и численно рассчитаны несколько конструкций планарной щелевой антенны, согласованной (по входу) с джозефсоновским генератором и (по выходу) с кремниевой эллиптической линзой. Представлены результаты расчетов согласования выходной мощности генератора с антенной различных конструкций, рассчитанных на четыре частотных диапазона: 250–410, 330–570, 380–520 и 420–700 GHz, суммарно перекрывающих область 250–700 GHz; рассчитаны диаграммы направленности и импеданс антенн.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20343).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46652.03NN

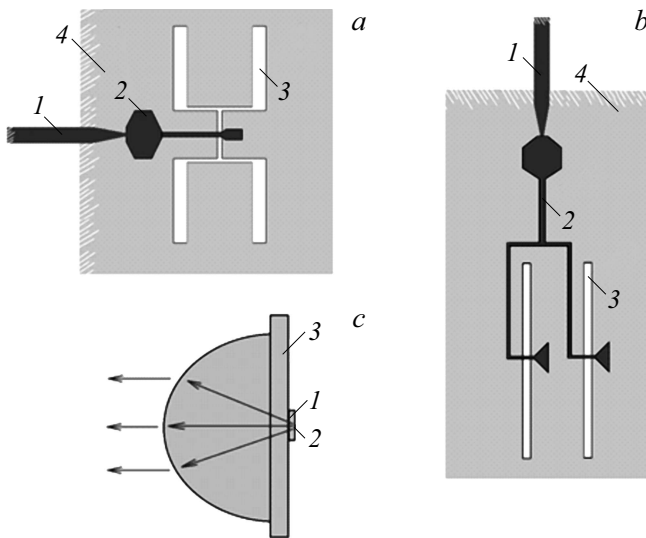
### 1. Введение

В настоящее время большой научной проблемой является отсутствие широкополосных источников в ТГц-области частот. Генератор ТГц диапазона на основе распределенного туннельного перехода Nb/AlOx/Nb или Nb/AlN/NbN успешно применен в качестве опорного гетеродина в составе сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) диапазона 450–650 GHz [1–3]. При этом диапазон перестройки частоты генератора существенно шире, а рабочий диапазон СИП определяется шириной полосы квазиоптической планарной линзовой антенны и согласующими линиями передачи между генератором и СИС-смесителем (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник). Так, на сегодняшний день диапазон генерации одного образца генератора на основе Nb/AlN/NbN размером  $400 \times 16 \mu\text{m}^2$  составляет от 200 до 750 GHz (ширина полосы около 100% от центральной частоты) с шириной линии генерации порядка 1 MHz, при этом верхняя граница области генерации ограничена половиной энергетической щели сверхпроводника, образующего линию передачи, и потенциально может составлять до 1 THz. Для стабилизации частоты излучения и синхронизации мощности в центральном пике используется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая сужает фактическую ширину линии до величины порядка 40 kHz и собирает до 97% мощности излучения в пике. Такой генератор обладает сравнительно малой выходной мощностью от долей до единиц  $\mu\text{W}$ , которой, тем не

менее, достаточно для широкого ряда задач. К таким задачам можно отнести гетеродинное детектирование в ТГц-диапазоне, где для накачки СИС-смесителей или НЕВ-смесителей (hot electron bolometer — болометры на электронном разогреве) требуется мощность в доли  $\mu\text{W}$ , а также лабораторную спектроскопию газов.

Джозефсоновский генератор на основе одиночного распределенного СИС-перехода на сегодняшний день использовался исключительно в составе интегральных приемных схем в качестве опорного генератора для накачки чувствительного элемента. В таких схемах генератор и смеситель размещены на одной микросхеме и согласованы посредством микрополосковых и копланарных линий передачи. Такое применение очень удобно с технической точки зрения, поскольку не требует внешнего источника гетеродина.

До сих пор неизвестны работы с попыткой создания генератора излучения в открытое пространство на основе распределенного СИС-перехода для практических приложений. Такая работа представляется целесообразной и интересной с практической точки зрения, поскольку генератор обладает сверхширокой рабочей полосой, достаточно прост в эксплуатации, относительно недорогой в изготовлении по сравнению с другими ТГц-источниками и имеет достаточную мощность для решения многих задач. Для вывода излучения генератора во внешнее пространство используется передающая антенно-линзовая система, согласованная с генератором. В данной работе проведены расчеты антенно-линзовых систем, работающих в диапазоне от 250 до 700 GHz.



**Рис. 1.** *a, b* — схематичное изображение планарной интегральной структуры ТГц генератора (1) на основе распределенного СИС-перехода, согласованного посредством микрополосковой линии (2) с щелевой антенной (3). Щелевая структура создана в слое металлизации (4), который является также нижним электродом микрополосковой линии; *c* — схематичное изображение микросхемы (1) с планарной интегральной структурой генератора и антенны (*a*) либо (*b*), размещенной в дальнем фокусе (2) кремниевой линзы (3). (Рисунок (*c*) выполнен не в масштабе.)

## 2. Концепция ТГц-генератора, интегрированного с линзовой антенной

Ключевая идея конструкции генератора состоит в том, что генератор интегрирован с передающей щелевой антенной на одной микросхеме (рис. 1, *a, b*). Микросхема размещается на поверхности собирающей эллиптической линзы из кремния, так что антенна попадает в фокус линзы (рис. 1, *c*). Материал подложки микросхемы и линзы выбран одинаковым — кремний с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 11.7$ , во избежание преломления лучей внутри конструкции системы. Таким образом, основная задача заключается в согласовании по мощности генератора с низким выходным импедансом (доли  $\Omega$ ) и квазиоптической линзовой антенны с относительно высоким импедансом (десятки  $\Omega$ ), а также в создании требуемой диаграммы направленности излучения.

Принцип работы генератора на основе распределенного СИС-перехода подробно описан, например, в работах [4–6]. В таком переходе под действием внешнего магнитного поля и тока смещения создается однонаправленный поток вихрей магнитного потока (флаксонов). Характерный размер флаксона составляет порядка двойной джозефсоновской глубины проникновения  $2\lambda_J$ , которая для характерной плотности тока порядка  $5 \text{ kA/cm}^2$  составляет около  $8 \mu\text{m}$ . Условие распределенности перехода заключается в том, что размер перехода в направле-

нии распространения флаконов (длина  $L$ ) много больше размера флаксона, то есть  $L \gg 2\lambda_J$ . Характерная длина таких генераторов составляет от  $300$  до  $700 \mu\text{m}$  при ширине  $W$  от  $3$  до  $20 \mu\text{m}$ . В данной работе для антенн с рабочим диапазоном выше  $400 \text{ GHz}$  планируется использование генератора, идентичного опорному генератору в СИП, с размерами  $400 \times 16 \mu\text{m}^2$ , а для работы в области ниже  $400 \text{ GHz}$  выбран переход длиной  $700 \mu\text{m}$ . Переходы будут выполнены на основе трехслойных СИС-структур Nb/AlOx/Nb или Nb/AlN/NbN с плотностью тока  $\sim 2\text{--}5 \text{ kA/cm}^2$ . Джозефсоновский генератор является генератором, управляемым напряжением, а частота  $f$  генерации определяется фундаментальным соотношением Джозефсона:

$$hf = 2eV_{\text{DC}},$$

где  $V_{\text{DC}}$  — постоянное напряжение на переходе. Для создания магнитного поля в области перехода используется линия управления магнитным полем, конструктивно представляющая собой нижний сверхпроводящий электрод из ниобия, через который пропускается постоянный ток.

Конструкция двух разрабатываемых типов щелевой антенны схематично показана на рис. 1, *a* и *b* (элемент 3). Щелевая антенна первого типа (рис. 1, *a*) была использована ранее в работе [7] в качестве приемной линзовой антенны СИС-приемника для центральных частот  $100$ ,  $246$  и  $500 \text{ GHz}$ , микросхема с антенной также устанавливалась на кремниевую линзу. Такая геометрия планарной антенны была выбрана в текущей работе для первой попытки согласовать генератор на потоке джозефсоновских вихрей с открытым пространством. Антенна такого типа является более узкополосной, чем используемый генератор, поэтому необходимый рабочий диапазон  $250\text{--}700 \text{ GHz}$  реализован тремя геометрическими конструкциями антенны с центральной частотой  $350$ ,  $450$  и  $600 \text{ GHz}$ . Конструкции антенны отличаются между собой геометрическими размерами элементов (длина и ширина четырех „вырезов“ и соединения между ними, расстояние между „вырезами“), а также топологией микрополосковой линии передачи (рис. 1, *a*, элемент 2), в том числе трансформатора импеданса. Также предложен второй тип щелевой антенны, рассчитанный на центральную частоту  $450 \text{ GHz}$ , совпадающую с центральной частотой одной из трех ранее обозначенных конструкций. Антенна второго типа (рис. 1, *b*) была использована ранее в работе [8] также в качестве приемной линзовой антенны в составе СИС-приемника частоты  $500 \text{ GHz}$ , СИС-смеситель с импедансом порядка  $4 \Omega$  был включен в микрополосковую линию. Все конструкции щелевых антенн будут выполнены в тонких пленках Nb толщиной  $\sim 200 \text{ nm}$ . В качестве собирающей линзы для всех конструкций антенн выбрана кремниевая линза эллиптической формы с шириной эллипса  $10 \text{ mm}$ . В точности такая линза использована в СИП в составе инструмента TELIS для исследования спектров атмосферных газов в диапазоне  $450\text{--}650 \text{ GHz}$  в режиме сканирования на высоте  $20\text{--}35 \text{ km}$  [2]. Величина утолщения

над полу-эллипсом линзы с учетом толщины кремниевой подложки 0.535 mm выбрана такой, чтобы дальний фокус эллипса приходился точно на плоскость антенны. В работе [7] было показано, что такая линза с учетом расположения в ее фокусе согласованной антенны может эффективно использоваться в широком диапазоне частот 0.1–1 THz без необходимости менять геометрию линзы. Поскольку для работы сверхпроводящего генератора на основе Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb или Nb/AlN/NbN необходимо охлаждение, вся конструкция генератора с антенно-линзовой системой размещается в криогенной установке при температуре жидкого гелия 4.2 К, при этом антенна и микрополосковые линии передачи из Nb с критической температурой  $T_c \sim 9$  К также находится в сверхпроводящем состоянии.

### 3. Результаты численного расчета: мощность, импеданс, направленность антенн

Расчеты излучающей структуры антенн проводились в специализированной программе трехмерного численного моделирования CST Studio. Для учета сверхпроводящего состояния антенн и микрополосковых линий передачи использовано значение лондоновской глубины проникновения магнитного поля для тонких пленок из Nb  $\lambda_L = 85$  nm. На рис. 2 представлены результаты расчета согласования по мощности для трех конструкций антенн первого типа из рис. 1, *a*, рассчитанных на центральные частоты 350, 450 и 600 GHz (здесь и далее конструкции соответствуют подписям на графиках A-350, A-450 и A-600), — показан процент мощности излучения в открытое пространство от полной выходной мощности генератора, в зависимости от частоты. Более 70% мощности излучается антеннами в диапазонах 250–410, 330–570 и 420–700 GHz, при этом характер зависимости достаточно равномерный в окрестности центральной частоты. Микрополосковая линия передачи проектировалась таким образом, чтобы согласовать

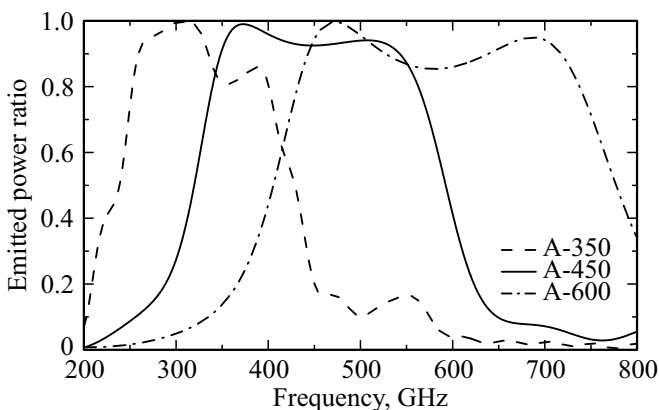


Рис. 2. Доля мощности, излученной антенной первого типа трех различных конструкции, в полный телесный угол  $4\pi$ .

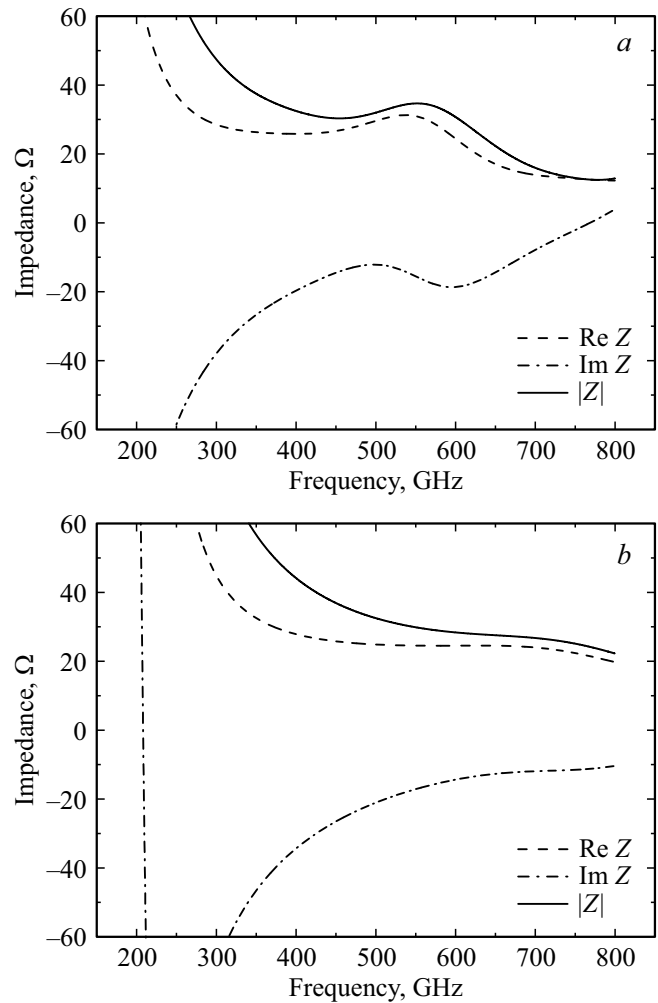
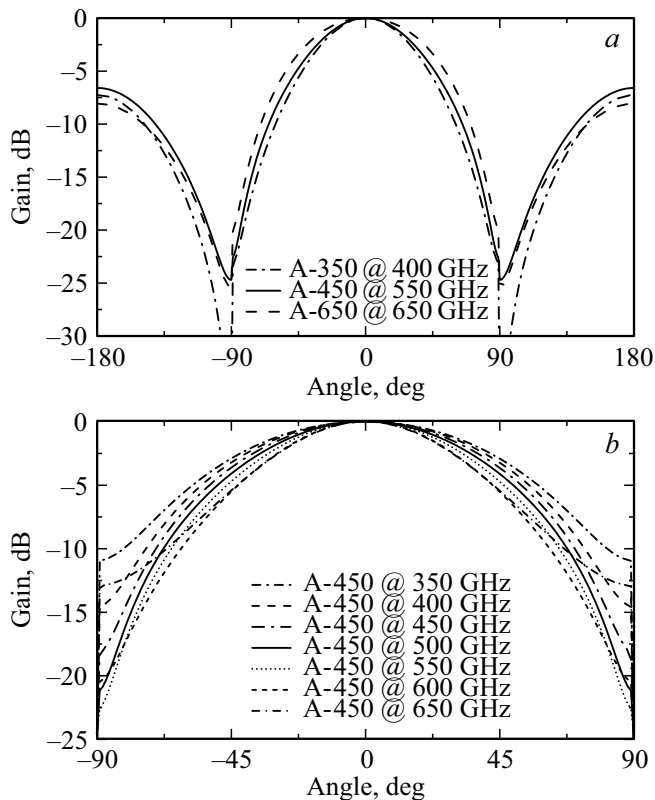


Рис. 3. *a* — импеданс антенны центральной частоты 450 GHz (диапазон 330–570 GHz); *b* — импеданс антенны центральной частоты 600 GHz (диапазон 420–700 GHz).

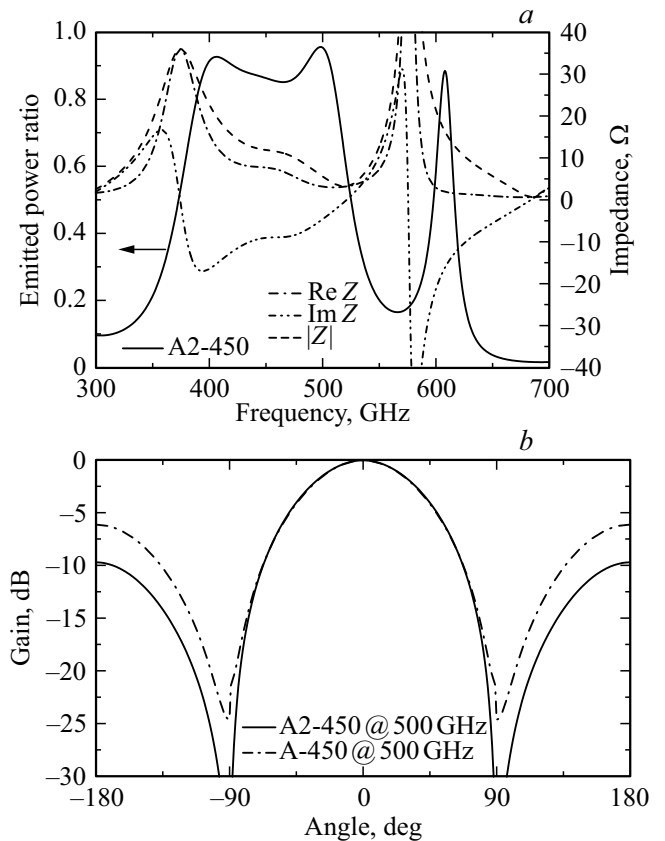
низкий выходной импеданс генератора, положенный в расчетах равным 0.5  $\Omega$  и не зависящим от частоты, и высокий входной импеданс квазиоптической щелевой антенны. На рис. 3, *a, b* представлены импедансы антенн первого типа, рассчитанных на центральные частоты 450 и 600 GHz, в точке подключения к линии передачи, идущей от генератора. В обоих случаях зависимость импеданса от частоты в пределах рабочего диапазона является достаточно плоской, без скачков, полный импеданс меняется в пределах 14  $\Omega$ : от 30 до 40  $\Omega$  для антенны 450 GHz и от 26 до 40  $\Omega$  для антенны 600 GHz. На рис. 4, *a* показаны диаграммы направленности антенн трех конструкций на выбранной частоте вблизи центральной частоты, подавляющая часть мощности сосредоточена в центральном лепестке. На рис. 4, *b* представлен набор диаграмм направленности для антенны 450 GHz на частотах от 350 до 650 GHz с шагом 50 GHz. Набор диаграмм на разных частотах рабочего диапазона показывает слабую зависимость от рабочей частоты

излучения, а также демонстрирует наиболее узкий центральный лепесток на частотах вблизи центральной, и уширение диаграммы при удалении от центральной частоты: для антенны 450 GHz наиболее широкая диаграмма из представленного набора на частотах 350 и 650 GHz. Все расчеты производились без учета линзы, добавление линзы к антенне существенно уменьшает ширину и увеличивает мощность центрального лепестка диаграммы, при этом не влияет на согласование по мощности генератора с антенной. Общий рабочий диапазон трех разработанных конструкций антенн первого типа составляет от 250 до 700 GHz.

Результаты численного расчета для антенны центральной частоты 450 GHz второго типа конструкции из рис. 1, *b* (обозначение конструкции антенны на графиках — A2-450), аналогичные представленным результатам для антенн первого типа, приведены на рис. 5, — мощность и импеданс (рис. 5, *a*), диаграмма направленности (рис. 5, *b*). Рабочий диапазон данной антенны по уровню излученной мощности 0.7 составил 380–520 GHz, что на 100 GHz меньше по ширине, чем для антенны первого типа с такой же центральной частотой 450 GHz. Форма центрального лепестка диаграммы направленности такой антенны практически не отличается от формы для антенны первого типа (см. рис. 5, *b*), однако, мощность лепестка в противо-



**Рис. 4.** *a* — диаграммы направленности антенн 350, 450 и 600 GHz на выбранной частоте вблизи центральной частоты; *b* — набор диаграмм направленности для антенны 450 GHz на частотах от 350 до 650 GHz с шагом 50 GHz.



**Рис. 5.** *a* — частотная зависимость доли излученной мощности (сплошная кривая), импеданса — действительная часть (штрихпунктирная линия), мнимая часть (штрих-пунктирная линия) и модуль (штриховая линия) — антенны второго типа центральной частоты 450 GHz; *b* — диаграмма направленности антенны второго типа на частоте 500 GHz (сплошная линия) в сравнении с диаграммой антенны первого типа на такой же частоте.

ложном направлении в сторону вакуума относительно рабочего направления в сторону подложки у такой антенны существенно ниже — на 6.5 dB. Таким образом, несмотря на то, что антенна второго типа является более узкополосной, чем антенны первого типа, есть основания ожидать большую выходную мощность.

#### 4. Заключение

Сверхпроводниковый генератор ТГц-диапазона на направленном потоке джозефсоновских вихрей (флаконов) представляется интересным решением ТГц-источника для задач, где требуется широкая рабочая полоса перестройки и не требуется высокая мощность. К таким задачам можно отнести гетеродинное детектирование и спектроскопию газов, а область применения данных задач крайне широка — радиоастрономия и астрофизика, мониторинг атмосферы Земли, приборы для медицинской диагностики и систем безопасности, мониторинг технологических процессов на производ-

стве, информационно-телекоммуникационные системы. В работе предложена идея и практическая реализация вывода ТГц-излучения из плоскости структуры генератора на основе туннельного СИС-перехода в открытое пространство посредством щелевой ТГц-антенны, согласованной с эллиптической линзой. Представлены результаты начального этапа работ — численный расчет структур антенны и фидера на основе микрополосковой линии передачи, разработанных для частот 250–410, 330–570 и 420–700 GHz; три конструкции суммарно перекрывают диапазон 250–700 GHz. Представлены согласование по мощности входной линии антенны с открытым пространством и диаграммы направленности, рассчитан импеданс антенн. Проведены численные расчеты альтернативной конструкции более узкополосной антенны 380–520 GHz, которая также может достигнуть эффективной практической реализации за счет более высокой выходной мощности. Следующим этапом работы должно стать изготовление рассчитанных сверхпроводниковых структур методами магнетронного напыления и электронно-лучевой литографии, а затем экспериментальное исследование разработанных и изготовленных образцов генератора. Другим важным направлением работы является возможность стабилизации частоты и синхронизации мощности излучения в центральном пике системой ФАПЧ, для этого будет проведена разработка конструкции антенны с ответвлением части мощности генератора на гармонический смеситель, включенный в петлю обратной связи с генератором.

## Список литературы

- [1] V.P. Koshelets, S.V. Shitov. *Supercond. Sci. Technol.* **13**, R53 (2000).
- [2] G. de Lange, D. Boersma, J. Dercksen, P. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, H. Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, L. de Jong, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, B. van Kuik, A. de Lange, J. van Rantwijk, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, Ed de Vries, P.A. Yagoubov, V.P. Koshelets. *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 4, 045016 (2010).
- [3] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, Arno de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, M.Y. Li, H. Wang. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **5**, 4, 687 (2015).
- [4] T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Iri, K. Yoshida. *J. Appl. Phys.* **54**, 3302 (1983).
- [5] Y. Zhang. Theoretical and experimental studies of the flux-flow type Josephson oscillator. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden (1991). 57 p.
- [6] T. Van Duzer, C.W. Turner. *Principles of Superconductive Devices and Circuits*. 2nd ed. Prentice Hall (1998). 448 p.
- [7] D.F. Filipovic, S.S. Gearhart, G.M. Rebeiz. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **41**, 10, 1738 (1993).
- [8] J. Zmuidzinis. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **40**, 9, 1797 (1992).

Редактор Т.Н. Василевская