

ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЕ ДЛЯ ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ГЕНЕРАТОРА ТГц ДИАПАЗОНА

Н.В. Кинев¹, К.И. Рудаков^{1,2,3}, А.М. Барышев³, В.П. Кошелец¹

*¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
nickolay@hitech.cplire.ru*

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

³Университет Гронингена, г. Гронинген, Нидерланды

Генератор на основе распределённого джозефсоновского туннельного СИС-перехода (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) представляет перспективным типом направленного источника электромагнитного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Такой генератор обладает сверхширокой рабочей полосой – вплоть до 100% от центральной частоты, и успешно испытан в качестве гетеродина для сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП) диапазона 450-650 ГГц. В данной работе предложена схема генератора, в которой генератор интегрирован на одной микросхеме с планарной щелевой передающей антенной на кремниевой линзе и излучает сигнал ТГц частотного диапазона в открытое пространство. Предложены и численно рассчитаны несколько конструкций щелевой антенны, согласованной с кремниевой эллиптической линзой. Представлены результаты расчётов согласования выходной мощности джозефсоновского генератора с антенной различных конструкций, рассчитанных на три частотных диапазона: 300-420 ГГц, 380-580 ГГц и 510-700 ГГц; рассчитаны диаграммы направленности и импеданс антенн.

Введение

В настоящее время большой научной проблемой является отсутствие широкополосных источников в ТГц области частот. Генератор ТГц диапазона на основе распределённого туннельного перехода Nb/AlOx/Nb или Nb/AlN/NbN успешно применён в качестве опорного гетеродина в составе сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП) диапазона 450-650 ГГц [1,2]. 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. Так, на сегодняшний день диапазон генерации одного образца генератора на основе Nb/AlN/NbN размером 400x16 мкм² составляет от 200 до 750 ГГц (ширина полосы около 100% от центральной частоты) с шириной линии генерации порядка 1 МГц, при этом верхняя граница области генерации ограничена половиной энергетической щели сверхпроводника, образующего линию передачи, и потенциально может составлять до 1 ТГц. Для стабилизации частоты излучения и синхронизации мощности в центральном пике используется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которая сужает фактическую ширину линии до величины порядка 1 Гц и собирает до 97% мощности излучения в пике. Такой генератор обладает сравнительно малой выходной мощностью от долей до единиц мкВт, 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 (болометры на электронном разогреве) требуется мощность в доли мкВт, а также лабораторную спектроскопию газов.

Джозефсоновский генератор на основе одиночного распределённого СИС-перехода на сегодняшний день использовался исключительно в составе интегральных приёмных схем в качестве опорного генератора для накачки чувствительного элемента. В таких схемах генератор и приёмник 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 вывода излучения планарного распределённого СИС-перехода в открытое пространство. 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 практических задач. Для вывода излучения генератора во внешнее пространство используется передающая антенно-линзовая система, согласованная с генератором. В данной работе проведены расчёты антенно-линзовых систем,

работающих в диапазоне от 300 до 700 ГГц. Щелевая планарная антенна является более узкополосной, чем используемый генератор, поэтому указанный рабочий диапазон реализован тремя геометрическими конструкциями антенны, настроенными на диапазоны излучения 300-420 ГГц, 380 - 580 ГГц и 510-700 ГГц. Далее в тексте диапазоны обозначены своей центральной частотой – 360 ГГц, 480 ГГц и 600 ГГц соответственно.

Концепция ТГц генератора, интегрированного с антенной

Ключевая идея конструкции генератора состоит в том, что генератор интегрирован с передающей антенной на одной микросхеме (рис. 1а). Микросхема размещается на поверхности собирающей эллиптической линзы из кремния, так что антенна попадает в фокус линзы (рис. 1б). Материал подложки микросхемы и линзы выбран одинаковым – кремний с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 11,7$, во избежание преломления лучей внутри конструкции системы. Таким образом, основная задача заключается в согласовании по мощности генератора и квазиоптической линзовой антенны, а также в создании требуемой диаграммы направленности излучения.

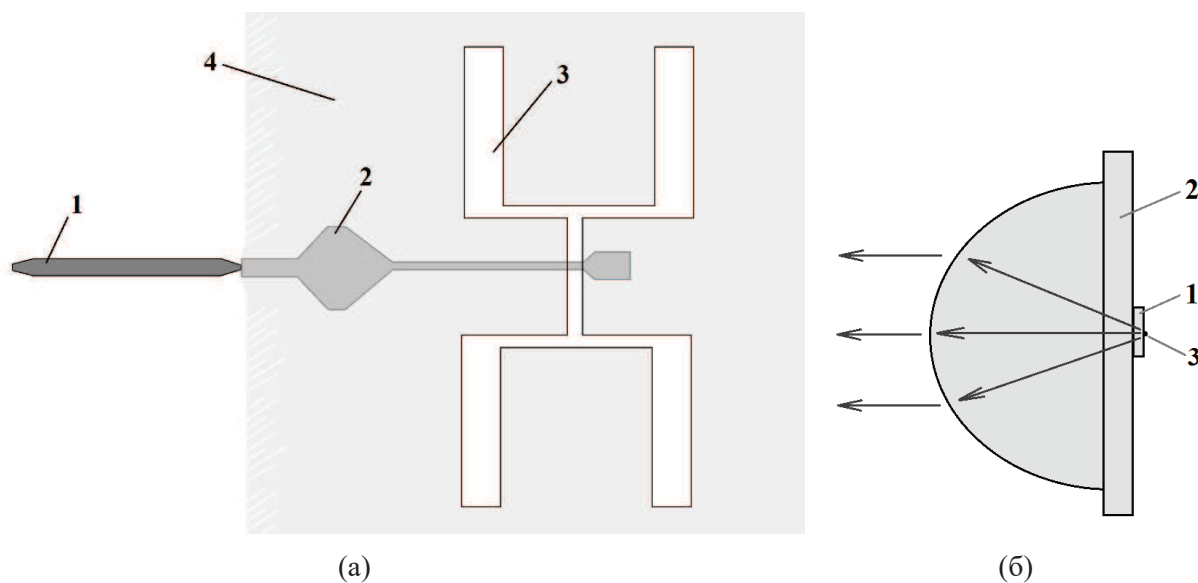


Рис. 1. (а) – схематичное изображение планарной интегральной структуры ТГц генератора (1) на основе распределённого СИС-перехода, согласованного с щелевой антенной (3) посредством микрополосковой линии (2). Щелевая структура создана в слове металлизации (4), который является также нижним электродом микрополосковой линии.

(б) – схематичное изображение микросхемы (1) с планарной интегральной структурой генератора и антенны (а), размещённой в дальнем фокусе (3) кремниевой линзы (2). Рисунки (а), (б) выполнены не в масштабе, размеры и пропорции элементов не соблюдены.

Принцип работы генератора на основе распределённого СИС-перехода подробно описан, например, в работах [3-5]. В таком переходе под действием внешнего магнитного поля и тока смещения создаётся однонаправленный поток вихрей магнитного потока (флаксонов). Характерных размер флаксона составляет порядка двойной джозефсоновской глубины проникновения $2\lambda_J$, которая для характерной плотности тока порядка 5 кА/см^2 составляет около 8 мкм. Условие распределённости перехода заключается в том, что размер перехода в направлении распространения флаконов (длина L) много больше размера флаксона, т.е. $L \gg 2\lambda_J$. Характерная длина таких генераторов составляет от 300 до 700 мкм при ширине W от 3 до 20 мкм. В данной работе для диапазонов 480 ГГц и 600 ГГц планируется использование генератора, идентичного опорному генератору в СИП, с размерами $400 \times 16 \text{ мкм}^2$, а для работы в диапазоне 360 ГГц переход длиной 700 мкм. Переходы будут выполнены на основе трёхслойных СИС-структур $\text{Nb}/\text{AlOx}/\text{Nb}$ или $\text{Nb}/\text{AlN}/\text{NbN}$ с плотностью тока $\sim 2\text{-}5 \text{ кА/см}^2$.

Джозефсоновский генератор является генератором, управляемым напряжением, а частота f генерации определяется фундаментальным соотношением Джозефсона:

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

где V_{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.

Общая конструкция разрабатываемой щелевой антенны схематично показана на рис. 1а, элемент (3). Щелевая антенна такого типа была использована ранее в работе [6] в качестве приёмной линзовой антенны СИС-приёмника для центральных частот 100 ГГц, 246 ГГц и 500 ГГц, 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. Конструкции антенны, рассчитанные на разные частотные диапазоны – 360 ГГц, 480 ГГц и 600 ГГц – отличаются между собой геометрическими параметрами элементов (длина и ширина четырёх «вырезов» и соединения между ними, расстояние между «вырезами»), а также геометрией микрополосковой линии передачи (см. рис.1 а, элемент 2), в том числе трансформатора импеданса. В качестве собирающей линзы выбрана кремниевая линза эллиптической формы с шириной эллипса 10 мм. В точности такая линза использована в СИП в составе инструмента TELIS для исследования спектров атмосферных газов в диапазоне 450-650 ГГц в режиме сканирования на высоте 20-35 км [1]. Величина утолщения над полу-эллипсом линзы с учётом толщины кремниевой подложки 0,535 мм выбрана такой, чтобы дальний фокус эллипса приходился точно на плоскость антенны. В работе [6] было показано, что такая линза с учётом расположения в её фокусе согласованной антенны может эффективно использоваться в широком диапазоне частот 0,1-1 ТГц без необходимости менять геометрию линзы.

Результаты численного расчёта

Расчёты излучающей структуры антенн проводились в специализированной программе трёхмерного численного моделирования CST Studio. На рис. 2 и 3 представлены результаты для антенны центральной частоты 480 ГГц, расчёты производились без учёта линзы, которая в реальной системе значительно повышает направленность центрального лепестка [6]. Так, на рис.2 показан процент мощности излучения в открытое пространство от полной мощности, подаваемой от генератора на вход фидера, в зависимости от частоты. Из графика видно, что более 70% мощности излучается антенной в диапазоне от 380 ГГц до 580 ГГц, при этом характер зависимости достаточно равномерный в окрестности центральной частоты. На рис.3 показаны трёхмерные диаграммы направленности антенны на частотах от 400 ГГц до 600 ГГц с шагом в 50 ГГц. Из диаграмм (а)-(д) видно, что подавляющая часть мощности сосредоточена в центральном лепестке, а боковые лепестки уменьшаются при приближении к центральной частоте диапазона (500 ГГц наиболее близкая к 480 ГГц из представленных частот). Следует заметить, что добавление линзы к антенне существенно уменьшает ширину и увеличивает мощность центрального лепестка диаграммы, при этом не должно влиять на зависимость из рис. 2. Расчёт структуры с учётом линзы в программе усложняется геометрической распространённостью структуры, для которой время расчёта очень велико.

Аналогичные результаты получены для двух других конструкций, рассчитанных на диапазоны 360 ГГц и 600 ГГц. Таким образом, общий рабочий диапазон трёх разработанных конструкций антенно-линзовой системы составляет от 300 до 700 ГГц.

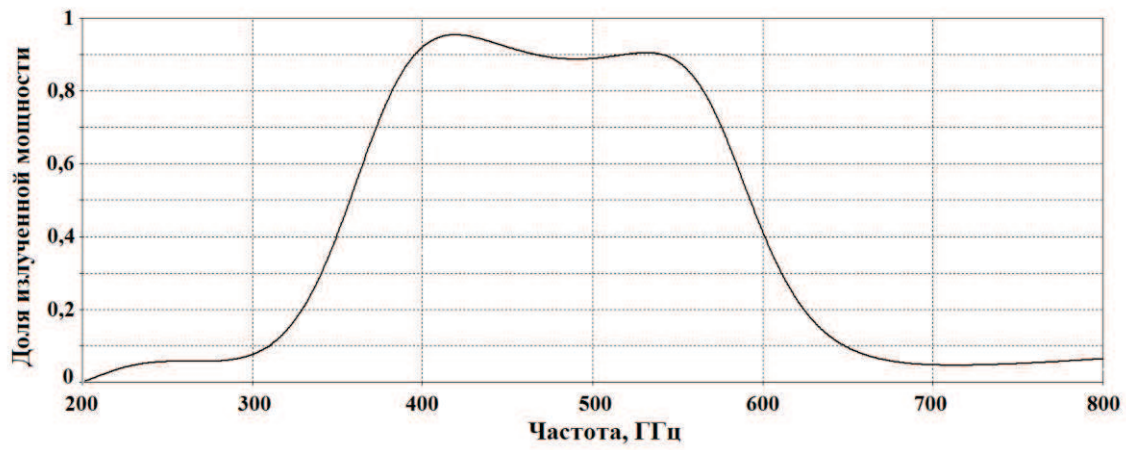
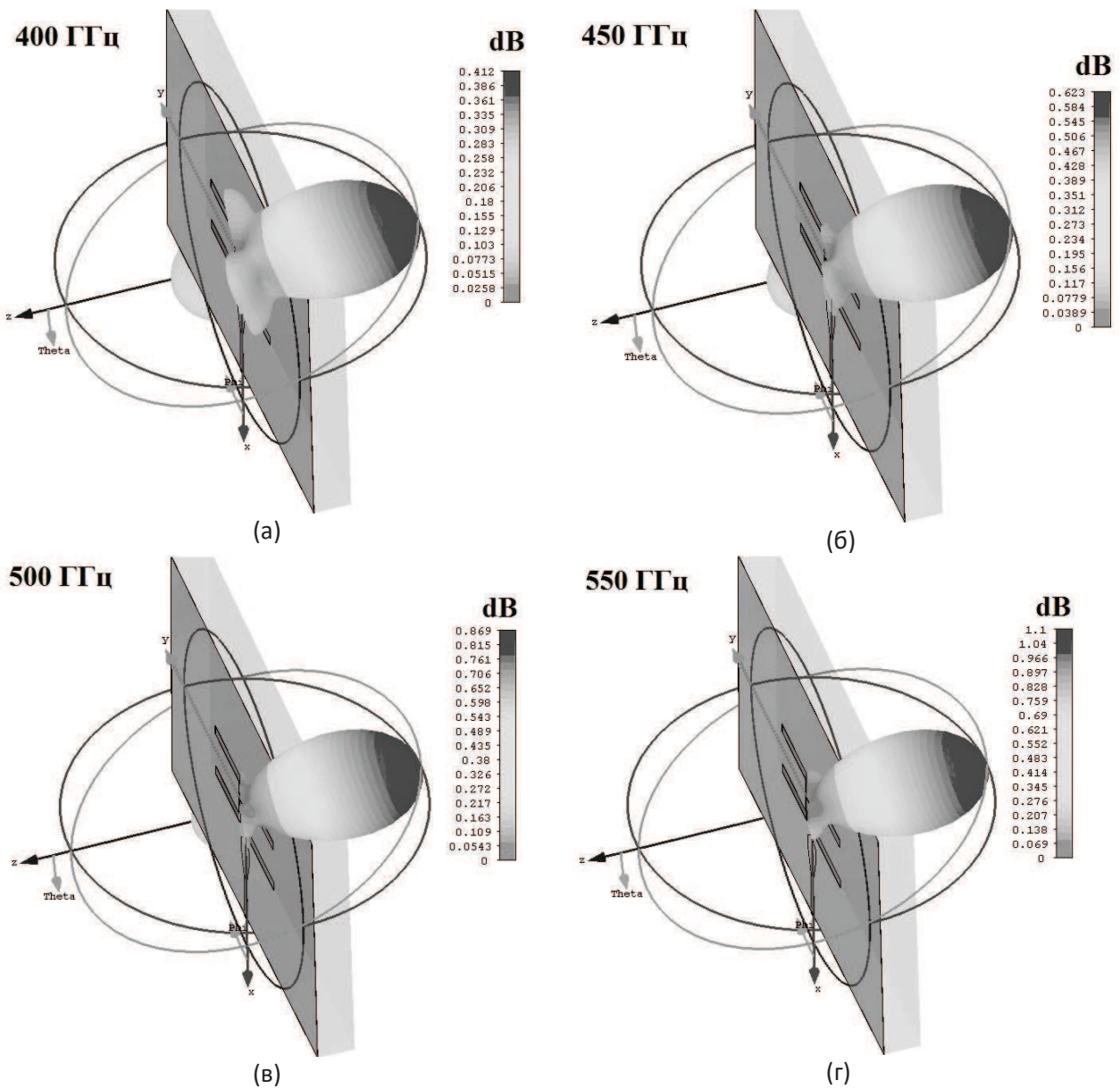


Рис. 2. Зависимость доли мощности, излучённой антенной 480 ГГц в открытое пространство в полный телесный угол 4π , от частоты. Рабочая полоса антенны составляет 380-580 ГГц.



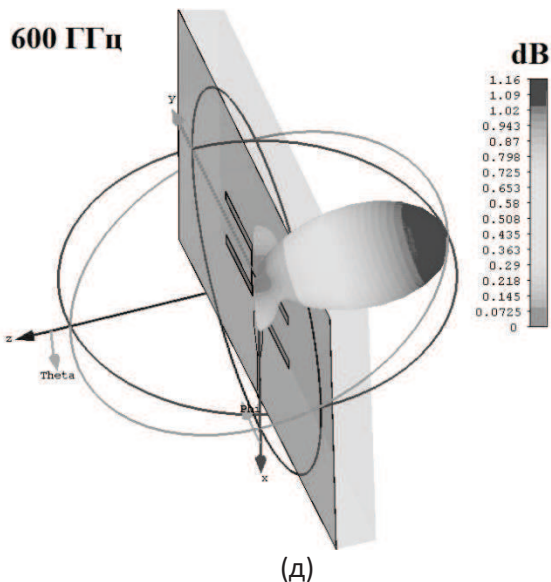


Рис. 3. Диаграммы направленности антенны центральной частоты 480 ГГц на частотах:

- (а) 400 ГГц;
- (б) 450 ГГц;
- (в) 500 ГГц;
- (г) 550 ГГц;
- (д) 600 ГГц.

Центральный лепесток направлен в сторону подложки микросхемы. Расчёты проведены без линзы.

Заключение

Сверхпроводниковый генератор ТГц диапазона на направленном потоке джозефсоновских вихрей (флаксон) 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. 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 расчёт структур антенны и фидера на основе микрополосковой линии передачи, разработанных для частот 300-420 ГГц, 380 - 580 ГГц и 510-700 ГГц; три конструкции суммарно перекрывают диапазон 300-700 ГГц. Представлены согласование по мощности антенны с открытым пространством и диаграммы направленности, также рассчитан импеданс антенн (не представлен в тексте). 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.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20343).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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, and V.P. Koshelets. Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder. // Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016. 2010.
2. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Michael I. Faley, Lyudmila V. Filippenko, Konstantin V. Kalashnikov, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Anton A. Artanov, Kirill I. Rudakov, Arno de Lange, G. de Lange, Vladimir L. Vaks, M. Y. Li, and Huabing Wang. Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. Vol.5, No.4, pp 687-694. 2015.
3. T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Iri, K. Yoshida. // J. Appl. Phys. Vol. 54. P. 3302. 1983.
4. Yongming Zhang. Theoretical and experimental studies of the flux-flow type Josephson oscillator. // Ph.D.-thesis, Chalmers University of Technology. 1991.
5. T. Van Duzer and C.W. Turner. Principles of Superconductive Devices and Circuits // Elsevier North Holland. Second Edition. 1999.
6. D.F. Filipovic, G.M. Rebeiz. Double-Slot antenna on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 41, No 10. 1993.