

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XII Международного  
симпозиума**

*12–15 марта 2018 г., Нижний Новгород*

*Том 1*

*Секции 1, 2, 4, 5*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского  
2018

УДК 538.9  
ББК 22.37; 22.33  
Н-25

**Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXII Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 12–15 марта 2018 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2018. — 507 с.  
ISBN 978-5-91326-446-6

#### **Организаторы**

Федеральное агентство научных организаций РФ  
Отделение физических наук РАН  
Научный совет РАН по физике полупроводников  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред  
Институт физики микроструктур РАН  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

#### **Сопредседатели Симпозиума**

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН  
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

#### **Учёный секретарь Симпозиума**

А.В. Новиков, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

#### **Программный комитет**

В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	ЗАО «НТ-МДТ», Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, чл.-корр. РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН,	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород

#### **Организационный комитет**

В.Г. Беллюстина, ИФМ РАН, Н. Новгород  
Д.М. Гапонова, к.ф.м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород  
Е.А. Девятайкина, ИФМ РАН, Н. Новгород  
М.В. Зорина, ИФМ РАН, Н. Новгород  
А.В. Иконников, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород  
Д.А. Камелин, ИФМ РАН, Н. Новгород  
Р.С. Малофеев, ИФМ РАН, Н. Новгород  
С.В. Морозов, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород  
Е.Н. Садова, ИФМ РАН, Н. Новгород  
Д.А. Татарский, ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-446-6

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет  
им. Н.И. Лобачевского, 2018  
© Институт физики микроструктур  
РАН, 2018

# Линзовая щелевая антенна 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, ул. Моховая, 11 стр.7, Москва, 125009.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701.

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

\*nickolay@hitech.cplire.ru

Предложена схема генератора терагерцового (ТГц) диапазона на основе распределённого туннельного СИС-перехода, в которой генератор интегрирован на одной микросхеме с планарной щелевой передающей антенной на кремниевой линзе и излучает сигнал в открытое пространство. Предложены и численно рассчитаны несколько конструкций щелевой антенны, согласованной (по входу) с джозефсоновским генератором и (по выходу) с кремниевой эллиптической линзой. Представлены результаты расчётов согласования выходной мощности генератора с антенной различных конструкций, рассчитанных на три частотных диапазона: 250-410 ГГц, 330-570 ГГц и 420-700 ГГц; рассчитаны диаграммы направленности и импеданс антенн.

## Введение

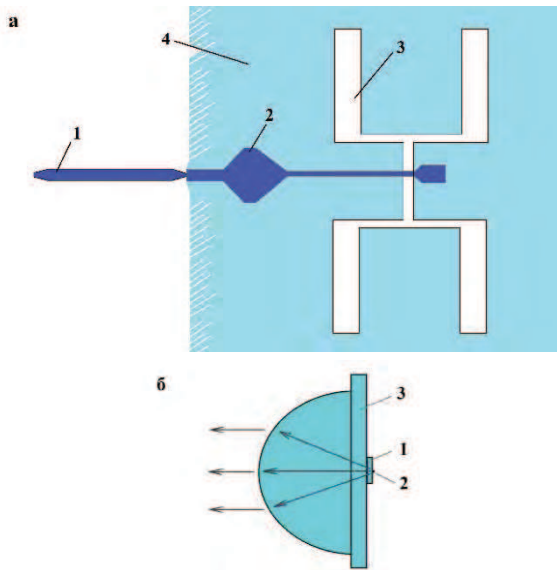
Одной из проблем современной радиофизики, астрономии и спектроскопии является отсутствие широкополосных источников в ТГц области частот. Генератор на основе сверхпроводникового туннельного СИС-перехода с геометрической длиной много больше джозефсоновской длины представляется перспективным источником в ТГц диапазоне. Такой генератор на основе туннельных структур Nb/AlOx/Nb и Nb/AlN/NbN обладает широкой рабочей полосой от 200 до 750 ГГц, что составляет порядка 100% от центральной частоты, и до настоящего момента применялся исключительно в качестве гетеродина в составе интегральных приёмных схем для накачки детектора. Неизвестны работы с попыткой вывода его излучения 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 – гетеродинное детектирование, спектроскопия газов.

## Концепция ТГц генератора

Принцип работы генератора на основе распределённого СИС-перехода подробно описан в классических работах (например, [1]), его современные

характеристики в составе сверхпроводникового интегрального приёмника диапазона 450-650 ГГц представлены в работе [2]. Так, на сегодняшний день диапазон генерации одного образца генератора на основе Nb/AlN/NbN размером 400x16 мкм<sup>2</sup> составляет от 200 до 750 ГГц 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. Частота генерации определяется фундаментальным соотношением Джозефсона  $hf = 2eV_{DC}$ , где  $V_{DC}$  – постоянное напряжение на переходе. Для стабилизации частоты излучения и синхронизации мощности в центральном пике используется система ФАПЧ, которая сужает фактическую ширину линии до величины порядка 1 Гц и собирает до 97% мощности излучения в пике.

Ключевая идея конструкции генератора в данной работе заключается в том, что генератор интегрирован с передающей антенной на одной микросхеме (рис. 1а), которая размещается на поверхности собирающей эллиптической линзы из кремния (рис. 1б). Таким образом, основная задача заключается в согласовании по мощности генератора с квазиоптической антенно-линзовой системой, а также в создании требуемой диаграммы направленности излучения.

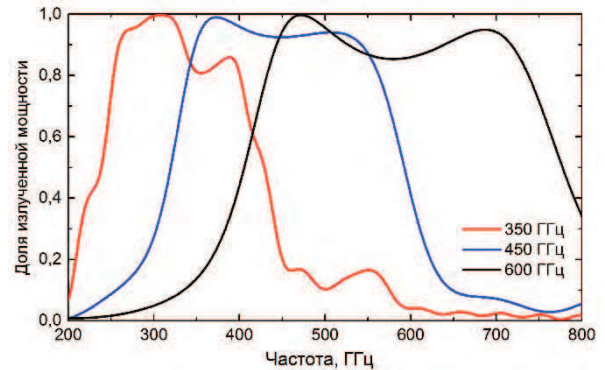


**Рис. 1.** а – схематичное изображение планарной интегральной структуры ТГц генератора (1) на основе распределённого СИС-перехода, согласованного посредством микрополосковой линии (2) с щелевой антенной (3). Щелевая структура создана в слое металлизации (4), который является также нижним электродом микрополосковой линии. б – схематичное изображение микросхемы (1) с планарной интегральной структурой генератора и антенны (а), размещённой в дальнем фокусе (2) кремниевой линзы (3). Рисунки (а), (б) выполнены не в масштабе, размеры и пропорции элементов не соблюдаются

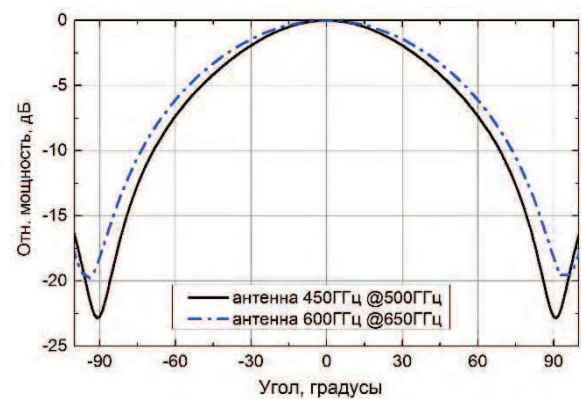
## Результаты численного расчёта

Расчёты согласования генератора с антенной по мощности и излучающей структуры антенн проводились в специализированной программе трёхмерного численного моделирования CST Studio. На рис. 2 представлены результаты расчёта согласования по мощности для трёх конструкций антенн, рассчитанных на центральные частоты 350 ГГц, 450 ГГц и 600 ГГц, – показан процент мощности излучения в открытое пространство от полной выходной мощности генератора. Более 70% мощности излучается антеннами в диапазонах 250 - 410 ГГц, 330 - 570 ГГц и 420 - 700 ГГц, при этом характер зависимости достаточно равномерный в окрестности центральной частоты. На рис.3 показаны диаграммы направленности антенн центральной частоты 450 ГГц и 600 ГГц, подавляющая часть мощности сосредоточена в центральном лепестке. Набор диаграмм на разных частотах рабочего диапазона показывает, что мощность боковых лепестков уменьшается при приближении к центральной частоте диапазона. Все расчёты производились без

учёта линзы, добавление линзы к антенне существенно уменьшает ширину и увеличивает мощность центрального лепестка диаграммы, при этом физически не влияет на зависимость из рис. 2. Следующим этапом работы должно стать изготовление рассчитанных сверхпроводниковых структур и экспериментальные исследования генератора.



**Рис. 2.** Доля мощности, излучённой антенной трёх различных конструкций, в полный телесный угол 4π



**Рис. 3.** Диаграммы направленности антенн диапазона 330 - 570 ГГц на частоте 500 ГГц и 420 - 700 ГГц при 650 ГГц

Предложенный ТГц генератор на направленном потоке джозефсоновских вихрей (флаксонов) представляется интересным решением ТГц источника для круга задач, где требуется широкая рабочая полоса перестройки и стабильность, при этом не требуется высокая мощность.

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

## Литература

1. T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Iri, K. Yoshida. // J. Appl. Phys., V. 54., P. 3302 (1983)
2. G.de Lange, D. Boersma *et al.* // Supercond. Sci. Technol., V. 23, 045016 (2010).