

# Сверхпроводниковый генератор гетеродина для интегральных приемных устройств терагерцового диапазона

В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, К.В. Калашников, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, А.А. Мухортова, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва  
e-mail: [valery@hitegh.cplire.ru](mailto:valery@hitegh.cplire.ru)

В ИРЭ им. Котельникова РАН был создан и доведен до практического применения интегральный сверхпроводниковый приемник [1, 2], включающий в себя СИС-смеситель с планарной приемной антенной и сверхпроводниковый генератор гетеродина. Этот прибор успешно использовался для измерения спектров газов в атмосфере Земли с борта высотного аэростата в рамках международного проекта ТЕЛИС. Для дальнейшего расширения частотного диапазона и реализации предельных параметров сверхпроводниковых элементов, составляющих интегральный приемник, проведен цикл фундаментальных исследований и практических разработок. Применение методов нанотехнологии и интеграция отдельных элементов в единое устройство позволило создать прибор с уникальным набором параметров, которые не могут быть достигнуты на основе традиционных подходов и технологий. Некоторые результаты проведенных исследований представлены в докладе.

Одним из ключевых элементов СИП является сверхпроводниковый генератор гетеродина, который размещается на одной микросхеме со смесительным элементом. Сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) представляет собой распределенный джозефсоновский СИС-переход, в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток квантов магнитного потока (флаконов). Таким образом, частота генерации управляется независимым заданием тока смещения и тока линии управления, создающей локальное магнитное поле через переход. Для успешной работы СИП очень важно иметь возможность непрерывной перестройки частоты генерации СГГ. Кроме того, чем более узкая линия генерации гетеродина, тем лучшим спектральным разрешением обладает приёмник, т.е. тем более точное восстановление спектра принимаемого излучения может быть получено. Процент мощности, сосредоточенный в центральном пике (спектральное качество), напрямую зависит от характеристик используемой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При использовании специально созданной полупроводниковой системы ФАПЧ спектральное качество СГГ составляет порядка 90% (при автономной ширине линии СГГ порядка 1 МГц).

Ранее нами было показано, что в результате эффекта джозефсоновской самонакачки (*Josephson Self-Coupling*) при напряжениях выше некоторого порогового  $V_b = 1/3$  от щелевого напряжения  $V_g$  скачком увеличиваются потери в туннельном переходе. Это эффект вызван поглощением собственного излучения СГГ в длинном джозефсоновском пе-

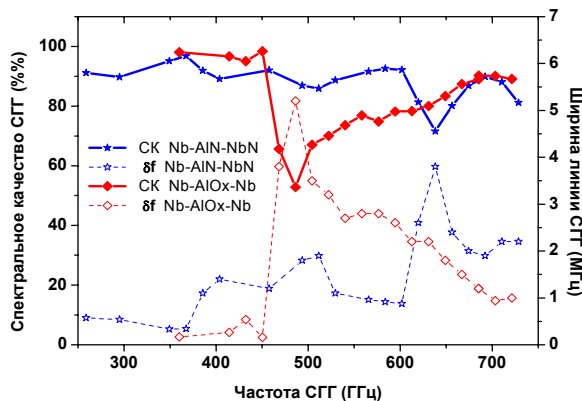
реходе и приводит к существованию двух режимов работы СГГ: резонансный режим ступеней Фиске реализуется ниже  $V_b$ , а режим «вязкого» движения флаконов - выше  $V_b$ .

Для СГГ на основе переходов Nb-AlN-NbN [3] оказывается возможной непрерывная перестройка частоты даже ниже порогового значения 600 ГГц ( $V_b = 1/3 * V_g = 1.2$  мВ), хотя затухание недостаточно для полного подавления резонансной структуры ступеней Фиске. Для коротких переходов с маленьким волновым фактором затухания  $\alpha$  расстояние между ступенями Фиске может быть настолько большим, что перестраивать СГГ можно будет только в некоторых «разрешенных» областях частот. Для 400-микронного Nb-AlN-NbN перехода коэффициент затухания достаточно высок, ступени Фиске имеют заметный наклон и расстояние между ними невелико. Это позволяет установить любую частоту СГГ в режиме ступеней Фиске, но для каждой частоты значения тока смещения должны лежать в определенных пределах. Для уменьшения отражения от концов и улучшения согласования с трактом приемника края туннельного перехода, образующего СГГ, были «заострены». Наилучшие результаты были получены при использовании экспоненциального профиля сужения, который обеспечивает меньшее отражение и лучшее подавление вторичных максимумов на зависимости  $I_c(H)$ , по сравнению со «стандартной» топологией с линейным профилем сужения.

Предыдущие измерения ширины линии излучения СГГ показали существенную зависимость автономной ширины линии  $\delta f$  СГГ от его постоянного напряжения, плотности тока и геометрии электродов смещения. Было показано, что  $\delta f$  значительно уменьшается с ростом ширины СГГ  $W$  для всех интересующих частот. Даже для наиболее широкого из всех измерявшихся переходов ( $W = 48$  мкм, что составляет более 8 джозефсоновских глубин проникновения магнитного поля в туннельный переход  $\lambda_J$ ) не наблюдалось ухудшения каких-либо характеристик СГГ. Мощность, приходящая в СИС-смеситель, увеличивается с одновременным уменьшением  $\delta f$  на всех частотах. Это происходит в соответствии с существующими теоретическими моделями и нашими ожиданиями. Дифференциальное сопротивление по току смещения  $R_d$  уменьшается обратно пропорционально величине сверхпроводящего тока туннельного перехода. Поскольку  $\delta f$  пропорциональна  $R_d^2 * I_b$ , она линейно уменьшается с шириной  $W$ . Конечно, можно ожидать, что сужение автономной линии излучения достигнет насы-

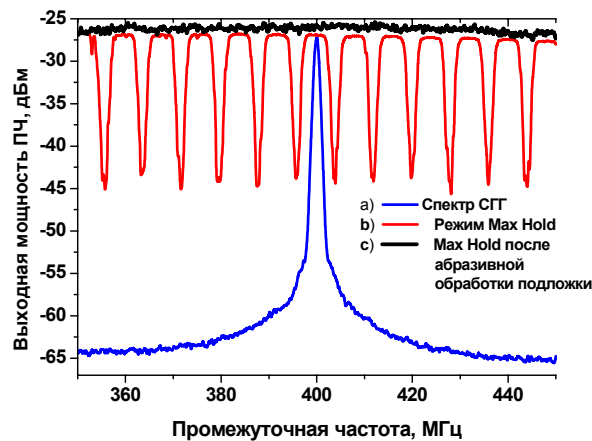
щения при некотором значении  $W$ , при котором также может произойти ухудшение мощностных характеристик из-за появления поперечных мод. В настоящее время дальнейшее увеличение ширины ограничено техническими соображениями (максимальные значения токов смещения и управления не должны превышать 70 мА). Для СГГ, используемого в проекте ТЕЛИС, выбрана ширина 16 мкм, которая обеспечивает оптимальное соотношение всех характеристик.

Проведенные нами исследования показали, что на основе трёхслойных структур из Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb и Nb/AlN/NbN возможно создание сверхпроводниковых генераторов гетеродина с непрерывной перестройкой частоты в диапазоне 250 – 720 ГГц и шириной линии излучения менее 4 МГц. Это позволяет реализовывать спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина в режиме ФАПЧ более 70 % во всем этом диапазоне (при соответствующем выборе типа структуры и ее топологии) – см. рис. 1. Продемонстрирована возможность получения фазовых шумов порядка –90 дБс при отстройке от несущей частоты более 100 кГц.



**Рис. 1.** Ширина линии генерации и спектральное качество сверхпроводниковых генераторов гетеродина на основе трёхслойных структур из Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb и Nb/AlN/NbN от частоты СГГ (СК измерено в режиме ФАПЧ).

Нами были обнаружены сверхтонкая резонансная структура на ВАХ джозефсоновского перехода, которая может быть объяснена возникновением звука. Эти структуры проявляются как на ВАХ джозефсоновского перехода, так и в спектре джозефсоновской генерации (см. рис. 2, кривая в). Проведенный нами анализ показал, что резонансные структуры вызваны резонансным возбуждением звука в подложке. Во-первых, после абразивной обработки подложки образца, на котором эти структуры были зарегистрированы, резонансы исчезли; этот метод используется сейчас для микросхем интегрального приемника (рис 2, кривая с). Во-вторых, расстояние между резонансами (примерно 10 МГц) совпадает с расстоянием между модами стоячих звуковых волн в кремниевой подложке. Предложена модель когерентного излучения и приема звука посредством взаимодействия джозефсоновской электромагнитной волны с механическим полем смещения, вызванным пьезоэлектрическим эффектом или электрострикцией.



**Рис. 2.** Сверхтонкая резонансная структура: а) спектр излучения СГГ, снятый в обычном режиме; б) спектр излучения СГГ, снятый в режиме max-hold для образца на полированной подложке; в) спектр излучения СГГ, снятый в режиме max-hold после абразивной обработки подложки.

Таким образом, созданы и исследованы электрически управляемые сверхпроводниковые генераторы гетеродина диапазона 250 - 720 ГГц, реализована стабилизация их частоты с помощью систем фазовой автоподстройки частоты. Такие генераторы успешно использованы при создании интегральных спектрометров субТГц диапазона для мониторинга атмосферы и медицинской диагностики, также для измерения спектров излучения из ВТСП мезоструктур; результаты этих исследований будут представлены в докладе. На полигоне «Esrange» (Швеция) проведены успешные запуски спектрометра на высотном аэростате. Реализован частотный диапазон 480 – 650 ГГц, шумовая температура 120 К (DSB), спектральное разрешение лучше 1 МГц. В ходе полета на высотном аэростате были измерены спектры различных газовых составляющих, в том числе SiO и VgO, ответственных за разрушение озонового слоя Земли, изучено их распределение в диапазоне высот 12 – 36 км во время восхода солнца.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-02-12195-офи\_м, 11-02-12195-офи\_м), а также гранта Президента России для ведущих научных школ НШ-5423.2010.2 и гос. контракта № 02.740.11.0795.

1. *Koshelets, V. P. Integrated Superconducting Receivers / V. P. Koshelets and S. V. Shitov // Supercond. Sci. Technol. 2000, v. 13, P. R53- R69.*

2. *Koshelets, V. P. Integrated Submm Wave Receiver: Development and Applications / V.P. Koshelets, M. Birk, D. Boersma, et al // Chapter in the book "Nanoscience Frontiers - Fundamentals of Superconducting Electronics", Springer Serie: Nanoscience and Technology\_35372, Editor: Anatolie Sidorenko, August 2011, P. 263-296.*

3. *Torgashin, M.Y. Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits / M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, et al // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2007, v. 17, P. 379- 382.*