

ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ИНЖЕКТОРАМИ.

Парамонов М.Е.¹, Голдобин Э.Б.², Кошелец В.П.¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, valery@hitech.cplire.ru

²Университет города Тюбинген, Германия, gold@uni-tuebingen.de

Впервые были проведены измерения ширины линии излучения нового типа сверхпроводящего генератора, основанного на распределённом джозефсоновском переходе с инжекторами. Хотя мощность излучения такого генератора невелика и составляет порядка 10 нВт, регистрация и изучение его характеристик представляет большой научный интерес. Электромагнитное излучение такого генератора принимается детектором (туннельным джозефсоновским переходом), находящимся на этом же чипе. Измерены спектры излучения такого генератора, сняты зависимости ширины линии от тока смещения. Построены зависимости, показывающие воздействие инжекторов на общую картину генерации.

Генератор, построенный на основе распределённого джозефсоновского перехода (РДП), является основой сверхпроводящего интегрального приёмника, разработанного в ИРЭ РАН [1]. Принцип его работы основан на режиме Flux-Flow. Электромагнитное поле, приложенное к переходу, способствует появлению кругового сверхтока – вихря внутри перехода (на краях контакта возникает такое граничное условие по полю, что фаза вдоль перехода меняется с образованием вихря). Ток смещения позволяет этому вихрю двигаться вдоль перехода, создавая на его краях всплески напряжения, свидетельствующие о начале генерации. До недавнего времени это был единственный способ получать на выходе такого генератора стабильный СВЧ – сигнал. Введением в конструкцию РДП двух линий токовых инжекторов появилась возможность менять состояние фазы без использования внешнего электромагнитного поля [2]. Как и ранее, для регистрации излучения генератора, использовался сверхпроводящий детектор (выступающий в роли смесительного элемента). Сигнал промежуточной частоты, полученный после смещения с сигналом внешнего полупроводникового генератора и усиления, подавался на спектроанализатор.

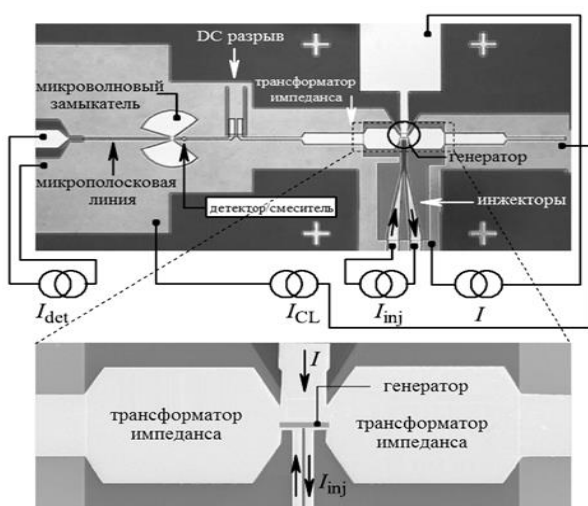


Рис.1. Фотография рабочей структуры, сделанная с помощью оптического микроскопа, и увеличенное изображение области расположения джозефсоновского генератора.

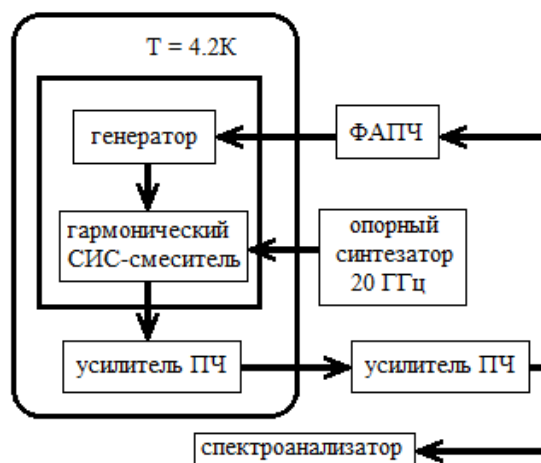


Рис. 2. Блок-схема системы для СВЧ-измерений

Вид микрочипа представлен на рис. 1; для изготовления чипов использовалась стандартная технология изготовления переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) Nb/AlO_x/Nb [3,4]. Все структуры изготавливались методами оптической литографии. Длина РДП составляла порядка 16 мкм, ширина порядка 2 мкм. Инжекторы, подходящие к центру верхнего электрода микрополосковой линии, оснащены ВЧ-фильтрами, которые расположены за пределами рисунка. С одной стороны генератора расположен трансформатор импеданса для уменьшения отражений, а с другой (используемой для измерения излучения) - два трансформатора импеданса и DC – разрыв. Согласующая схема рассчитана таким образом, чтобы передавать излучение от генератора к детектору в диапазоне частот 200 - 500 ГГц (типичная полоса пропускания 100 ГГц). Детектор представляет собой туннельный переход (площадь порядка 2мкм²), к которому через микрополосковую линию подключается внешний источник сигнала частотой порядка 10 ГГц для накачки гармонического смесителя. Сигнал промежуточной частоты снимается с этой же линии.

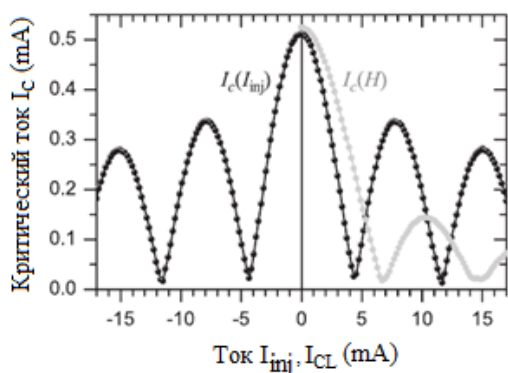


Рис. 3. Зависимости критического тока генератора от тока инжекторов (чёрным) и от внешнего магнитного поля (серым)

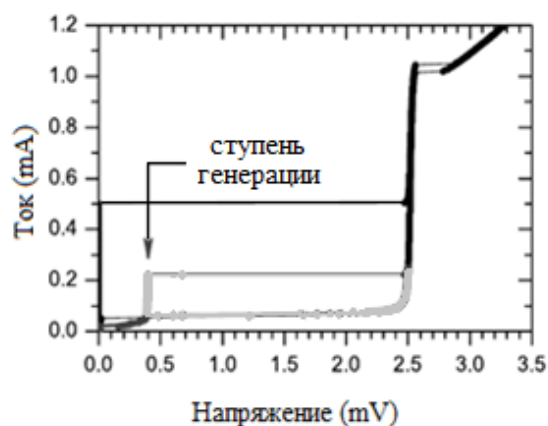


Рис. 4. График ВАХ генератора (чёрным), ВАХ генератора с током инжекторов (серым)

Измерения по постоянному току производились в транспортном гелиевом дьюаре, а для СВЧ – измерений использовался криостат. Для определения рабочей точки генератора снималась зависимость критического тока перехода от тока инжекторов. Для сравнения, также снималась зависимость критического тока от внешнего магнитного поля (описываемая соотношением Фраунгофера) и от тока инжектора; обе зависимости приведены на рисунке 3. На зависимости $I_c(I_{inj})$ выбирался ток I_{inj1} , соответствующий первому минимуму (полностью подавленному критическому току перехода). Далее снималась ВАХ генератора с определённым выше током инжекторов (на рисунке 4 изображены две ВАХ генератора без тока через инжекторы и при оптимальном токе). На зависимости появляется ступень, соответствующая режиму генерации излучения. Её напряжение должно соответствовать напряжению 1-й ступени Фиске, реализуемой при подаче магнитного поля.

Второй этап измерений проводился в специальном криостате, предназначенном для СВЧ измерений и оснащённый необходимыми СВЧ линиями и фильтрами. Как и при низкочастотных измерениях к инжектору прикладывался ток I_{inj1} , а ток питания генератора смещал рабочую точку в область ступени генерации. При этом накачка была видна на ВАХ СИС детектора. Далее, на СИС детектор подавался сигнал от опорного лабораторного СВЧ генератора на частоте ~10..12 ГГц, которая подбиралась так, чтобы N-я гармоника этого сигнала была близка по частоте к частоте генерации перехода с инжекторами (~190 ГГц). Нужная гармоника опорного синтезатора и сигнал на основной частоте генератора смешивались на СИС – детекторе. Получающийся сигнал на разностной (промежуточной) частоте ~ 400 МГц усиливался и выводился на экран спектроанализатора. В результате была измерена ширина линии излучения генератора с инжекторами. Типичное значение ширины линии составляет 1-10 МГц. На рисунке 5 показаны спектры излучения генератора, работающего на частоте примерно 197 ГГц, преобразованные вниз (по частоте) с помощью СИС – смесителя. Каждая линия снята

при разных токах смещения I_{bias} . Смеситель работает на 16 гармонике опорного синтезатора с частотой 12.283 ГГц.

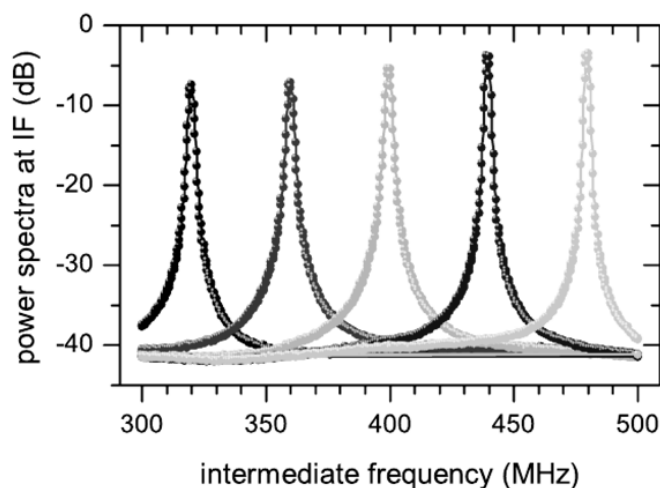


Рис. 5. Спектры излучения генератора при разных токах смещения I_{bias} .

Для детального исследования излучения генератора были проведены измерения зависимостей ширины линии излучения при перестройке тока смещения I_{bias} (что по сути является движением вдоль ступени генерации на ВАХ) и тока инжекторов I_{inj} (перемещение ступени вдоль оси напряжений). Результаты представлены на рис. 6 и 7. Были выявлены следующие закономерности:

- Ширина линии излучения уменьшается при смещении рабочей точки генератора вверх по ступени.
- Ширина линии излучения имеет типичные значения, реализуемые для геометрических резонансов (Фиске). Фактически генератор с инжекторами возбуждает Фиске резонансы, однако внешнее магнитное поле при этом не задается.

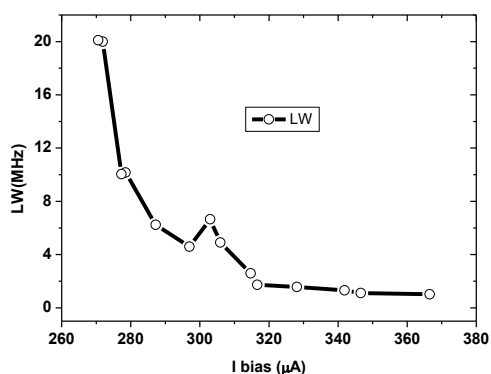


Рис. 6. Графики зависимости ширины линии излучения генератора от тока смещения I_{bias} , при токе через инжекторы равный 3.83 мА.

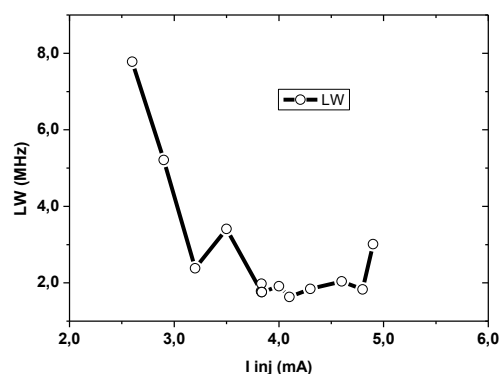


Рис. 7. График зависимости ширины линии излучения на ступеньке от тока инжектора I_{inj} при токе смещения 340 мкА.

В завершении были проведены эксперименты по фазовой стабилизации линии излучения генератора с инжекторами с помощью системы ФАПЧ. Сигнал обратной связи подавался в линию смещения. На рисунке 8 показаны преобразованные вниз по частоте спектры излучения на частоте 209.5

ГГц: серая линия – режим частотной стабилизации, чёрная – режим ФАПЧ (ток инжектора $I_{inj} = 3.84$ мА, ток смещения $I_{bias} = 245$ мкА); ширина линии в режиме ЧД = 1.2 МГц, SNR = 34.1 dB, спектральное качество в режиме ФАПЧ = 95.7 %.

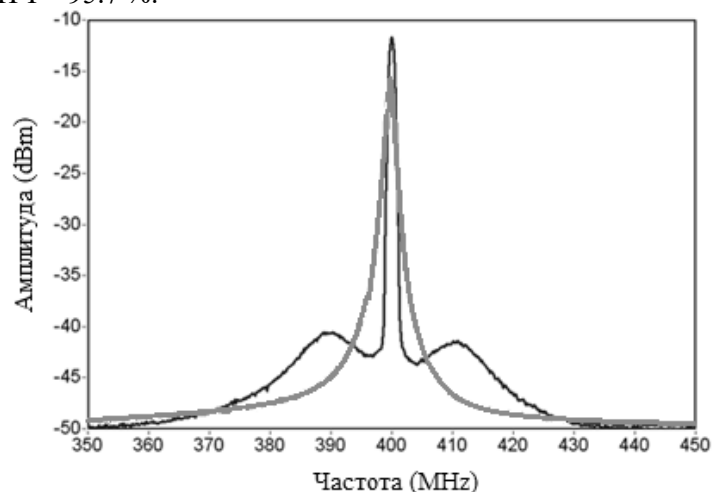


Рис. 8. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения на частоте 209.5 ГГц. Частотная стабилизация (серая кривая). Режим фазовой стабилизации (черная кривая).

До сих пор ни в одной лаборатории мира не проводилось исследование выходной мощности, ширины, фазовой и частотной стабилизации линии генерации джозефсоновского генератора с инжекторами, основанного на создании разрыва фазы внутри перехода. Резонансные ступеньки на вольтамперной характеристике, связанные с генерацией, наблюдались несколькими группами на $0-\pi$ переходах сверхпроводник – изолятор – ферромагнетик – сверхпроводник [5]. Однако параметры СВЧ излучения не измерялись. Проведенные исследования показали, что новый тип генератора с инжекторами позволяет получать стабильное узкополосное излучение диапазона 100 – 300 ГГц, частота этого излучения может быть стабилизирована с помощью системы фазовой автоподстройки. Такие генераторы могут быть использованы в различных устройствах сверхпроводниковой СВЧ электроники, где приложение внешнего магнитного поля является нежелательным.

Авторы выражают благодарность М.Ю. Фоминскому за изготовление фотошаблонов и Л.В. Филиппенко за советы и помощь в изготовлении тонкопленочных интегральных структур.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект "Терагерцовые интегральные приемники и генераторы на основе сверхпроводниковых наноструктур" (номер соглашения о предоставлении субсидии: 14.613.21.0046).

ЛИТЕРАТУРА

1. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko, "Superconducting Integrated Receiver for TELIS" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, 2005
2. M. Paramonov, M. Yu. Fominsky, V. P. Koshelets, B. Neumeier, D. Koelle, R. Kleiner, and E. Goldobin Applied Physics Letters 104, 062603 (2014)
3. V. Koshelets, S. Kovtonyuk, I. L. Serpuchenko, L. Filippenko, and A. Shchukin, IEEE Trans. Magn. 27, 3141 (1991).
4. P. Dmitriev, I. Lapitskaya, L. Filippenko, A. Ermakov, S. Shitov, G. Prokopenko, S. Kovtonyuk, and V. Koshelets, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, 107 (2003).
5. Pfeiffer J. et al. Static and dynamic properties of 0 , π , and $0-\pi$ ferromagnetic Josephson tunnel junctions // Physical Review B. – 2008. – Т. 77. – №. 21. – С. 214506.