

## ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ИНЖЕКТОРАМИ

М. Е. Парамонов<sup>1</sup>, Э. Б. Голдобин<sup>2</sup>, В. П. Кошелец<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Университет города Тюбинген, Германия

Статья получена 20 июня 2016 г.

**Аннотация.** Разработана интегральная микросхема для исследования спектральных характеристик сверхпроводникового генератора субтерагерцового диапазона с инжекторами. Электромагнитное излучение такого генератора принимается сверхпроводниковым туннельным джозефсоновским переходом, находящимся на этом же чипе. Была определена форма линии излучения и измерена её ширина. Построены зависимости, показывающие воздействие инжекторов на общую картину генерации. Хотя мощность излучения такого генератора невелика и составляет порядка 10 нВт, регистрация и изучение его характеристик представляет большой физический интерес.

**Ключевые слова:** туннельный переход сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС), СИС – смеситель, полуфлаксонный генератор, ширина линии излучения.

**Abstract.** An integrated microcircuit with a superconducting sub-THz generator based on a distributed Josephson junction with injectors for studying of its spectral characteristics was developed. The principle of operation of the generator is based on flipping a semifluxon that spontaneously appears at the  $\pi$  discontinuity of the Josephson phase artificially created by means of two tiny current injectors. Structurally, the injectors are located in the top layer of Josephson junction manufactured by «overlap» geometry. The generator is connected to the on-chip detector (Josephson tunnel junction superconductor - insulator – superconductor, SIS), via a microstrip line. The estimated radiation power (at the detector) is 8 nW

which is comparable with the dc power of 100nW consumed by the generator. Measurements of the linewidth of the generator were performed in a special cryostat for microwave tests. Signal from the reference laboratory microwave synthesizer (frequency approx. 10..12 GHz) was applied to detector. The desired harmonic of the microwave synthesizer was mixed with generator signal on SIS junction. The resulting signal at the difference (intermediate) frequency of about 400 MHz amplified and displayed on the screen of the spectrum analyzer. The measured linewidth was between 1 and 10 MHz, which is typical for the geometric (Fiske) resonances. We tried to suppress such resonances by placing well-matched microwave transformers at its both ends. In fact, generator with injectors excite Fiske resonances without applying external magnetic field. Dependences of the linewidth on of the generator bias current (with fixed injector current) and a injector current (with fixed bias current) were measured. It is shown that the linewidth of the generator is reduced while moving the operating point up within the Fiske step. It was an ability to shown this stabilization phase generator emission line with injectors. The ability of phase locking of the generator with injectors was demonstrated.

**Key words:** tunnel junction superconductor – insulator – superconductor (SIS), SIS – mixer, semifluxon generator, radiation line width.

## Введение

Генератор гетеродина, построенный на основе распределённого джозефсоновского перехода (РДП), является важнейшим элементом сверхпроводящего интегрального приёмника, разработанного в ИРЭ РАН [1, 2, 3]. РДП представляет собой длинный джозефсоновский туннельный переход сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС), подключенный к задающим линиям по геометрии «overlap» (от англ. перекрытие), см. рис.1.

Длина РДП  $L$  больше его ширины  $W$  и джозефсоновской глубины проникновения магнитного поля в переход  $\lambda_J$  (рис. 2). Типичные размеры гетеродина, основанного на РДП:  $L = 400 - 700 \text{ мкм}$ ,  $W = 4 - 28 \text{ мкм}$ .

Величина плотности критического тока через переход  $j_c = 2 - 8 \frac{\kappa A}{\text{см}^2}$ , что соответствует глубине проникновения  $\lambda_j = 8 - 4 \text{ мкм}$ . В качестве сверхпроводящих материалов используются ниобий Nb либо его нитрид NbN, электроды формируются на кремниевой подложке методами DC-магнетронного распыления в высоковакуумной камере и фотолитографии. Для туннельного слоя используются оксид алюминия, либо его нитрид.

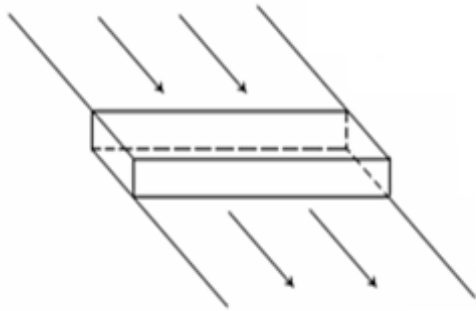


Рис. 1. Геометрия «overlap»

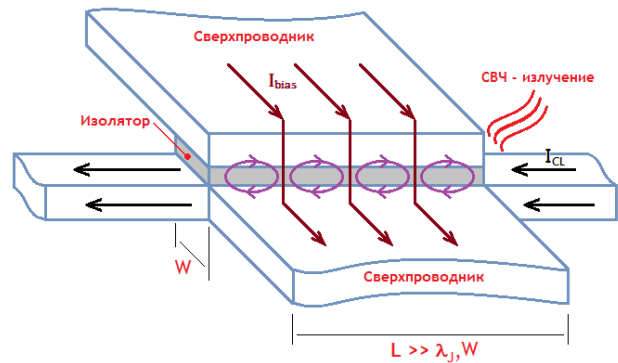


Рис. 2. Генератор на основе РДП

Принцип работы генератора на основе РДП состоит в следующем. Через переход задается постоянный ток смещения  $I_{bias}$  и прикладывается внешнее магнитное поле (параллельное плоскости перехода), которое задается током через линию управления. Магнитное поле способствует проникновению кванта магнитного потока внутрь перехода на одном из краёв контакта (джозефсоновская фаза  $\varphi(x)$  вдоль перехода меняется с образованием вихря, несущего квант магнитного потока  $\Phi_0 = \frac{h}{2e} 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ ), а ток смещения заставляет этот квант двигаться. В результате в переходе возникает однонаправленный поток джозефсоновских вихрей, каждый из которых имеет длину  $2\lambda_j$  вдоль плоскости перехода и  $2\lambda_L$  в направлении, перпендикулярном плоскости перехода, где  $\lambda_L$  - лондоновская глубина проникновения поля в переход (для ниобия Nb  $\lambda_L^{Nb} = 90 \text{ нм}$ ). Флаксоны, двигаясь вдоль перехода под действием силы Лоренца, отталкиваются друг от друга, образуют цепочку. При

пересечении противоположного края перехода движущимся флаксоном возникает всплеск напряжения, интеграл которого по времени равен величине «вышедшего» кванта магнитного потока  $\Phi_0 = \int V dt = 2mB \cdot 1nc$ . Скорость и плотность этой флаксонной цепи, а следовательно, мощность и частота электромагнитного излучения, возникающего при переходе квантов через границу, можно настраивать путём изменения тока смещения  $I_{bias}$  и тока через линию управления магнитным полем  $I_{CL}$ . Максимальная скорость движения флаксонов соответствует скорости распространения электромагнитных волн в джозефсоновском переходе, называемая скоростью Свайхарта. В таком режиме работы генератора мощность, передаваемая на нагрузку, может достигать  $\sim 1$  мкВт, эффективность преобразования АС/DC  $\sim 10\%$ , и ширина спектральной линии излучения  $\sim 1$  МГц. Ширина линии зависит от дифференциального сопротивления  $R_d$  в рабочей точке и чувствительна к шумам тока смещения  $I_{bias}$  (которые преобразуются во флуктуации напряжения) и шумам тока  $I_{CL}$ , задающего поле.

В работах [4, 5] была продемонстрирована возможность создания искусственного разрыва джозефсоновской фазы  $\varphi(x)$ , в результате чего происходило формирование дробного джозефсоновского вихря на месте разрыва. В работах [6, 7] разрыв фазы создавался с помощью двух инжекторов тока, подсоединённых к верхнему электроду РДП вблизи друг от друга. В работе [8] были проведены первые эксперименты по определению формы и ширины линии излучения генератора с инжекторами.

Инжекторы – это две сверхпроводящие линии шириной  $\Delta w$ , подведённые к середине РДП и расположенные на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга. При пропускании тока  $I_{inj}$  текущего от одного инжектора к другому через маленький участок верхнего электрода РДП, расположенный между инжекторами, возникает разрыв джозефсоновской фазы. Для того чтобы этот разрыв можно было рассматривать как точечный, размер всей конструкции инжекторов, т.е.  $2\Delta w + \Delta x$ , должен быть много меньше  $\lambda_J$ . В месте введения

$\pi$  – разрыва заданием определённого постоянного тока через инжекторы в РДП формируется так называемый полуфлаксон, закреплённый на этом разрыве. При подаче тока питания, полуфлаксон переворачивается, порождая флаксон, который движется в направлении одного из краёв перехода. При последующем перевороте (уже антиполуфлаксона) происходит излучение антифлаксона, который движется в направлении противоположного края перехода. Цикл повторяется бесконечно при условии, что ток питания больше тока депининга – тока переворота полуфлаксона. Такая динамика является достаточно необычной, и ничего подобного в джозефсоновских структурах ранее не

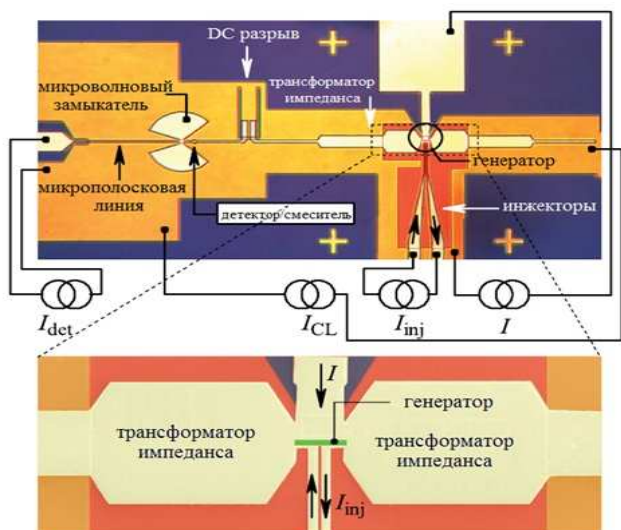


Рис. 3. Фотография рабочей структуры, сделанная с помощью оптического микроскопа и увеличенное изображение области расположения джозефсоновского генератора. наблюдалось.

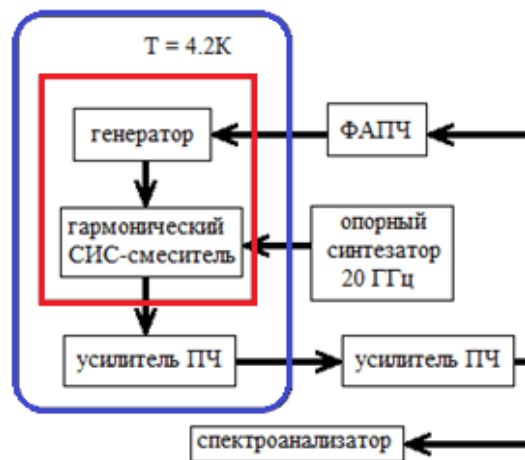


Рис. 4. Блок – схема системы для СВЧ – измерений

Вид экспериментальной микросхемы представлен на рис. 3; для изготовления тестовых структур использовалась стандартная технология изготовления переходов сверхпроводник - изолятор – сверхпроводник (СИС)

Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb [9, 10]. На одной микросхеме размещаются РДП генератор с инжекторами (размер которого  $16 \times 2$  мкм, сами инжекторы шириной 2 мкм и расстоянием между ними 2 мкм), гармонический смеситель на основе туннельного перехода сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) площадью около  $2 \text{ мкм}^2$  и микрополосковая линия, соединяющая генератор со смесителем и рядом дополнительных устройств. Генератор с одной стороны (справа на рисунке 3) подключён к трансформатору импеданса для уменьшения отражений, а с другой (используемой для измерения излучения) – к такому же трансформатору импеданса, который необходим для согласования микрополосковой линии и имеющего низкий импеданс РДП - генератора. Левее расположен DC – разрыв, который позволяет независимо задавать токи смещения и снимать напряжения для РДП и детектора. Далее находится микроволновый замыкатель, необходимый для подключения на землю по СВЧ небольшого участка микрополосковой линии, индуктивность которого используется для отстройки ёмкости СИС – перехода в диапазоне частот работы смесителя. Блок – схема для СВЧ – измерений показана на рисунке 4. Красным прямоугольником ограничена область с устройствами, расположенными на чипе. Область, обозначенная синим цветом, ограничивает элементы, которые находятся при температуре жидкого гелия 4.2 К. На гармонический СИС – смеситель через микрополосковую линию приходит исследуемый сигнал от генератора и сигнал опорного синтезатора (находящегося при комнатной температуре). На выходе смесителя появляется сигнал на промежуточной частоте (ПЧ)  $f_{ПЧ}$ , равной разности частот генерации РДП  $f_{РДП}$  и n-ой гармоники опорного синтезатора  $f_{ОС}$

$$f_{РДП} = n \cdot f_{ОС} \pm f_{ПЧ}$$

Далее сигнал поступает на криогенный НЕМТ–усилитель (High electron mobility transistor), затем на теплые усилители ПЧ, находящиеся при комнатной температуре. Таким образом формируется преобразованный вниз по частоте сигнал от сверхпроводящего генератора, регистрируемый

спектроанализатором. Для частотной и фазовой стабилизации линии излучения генератора используется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

### DC– измерения

Измерения по постоянному току производились в транспортном дьюаре с жидким гелием, а для СВЧ – измерений использовался криостат. Для калибровки инжекторов была снята зависимость критического тока перехода от тока инжекторов  $I_c(I_{inj})$ . На зависимости  $I_c(I_{inj})$  (рис. 5)  $\pi$  – разрыв, необходимый для создания полуфлаксона, достигается в первом минимуме, т.е. при полностью подавленном критическом токе перехода (ток  $I_{inj\_1}$ ).

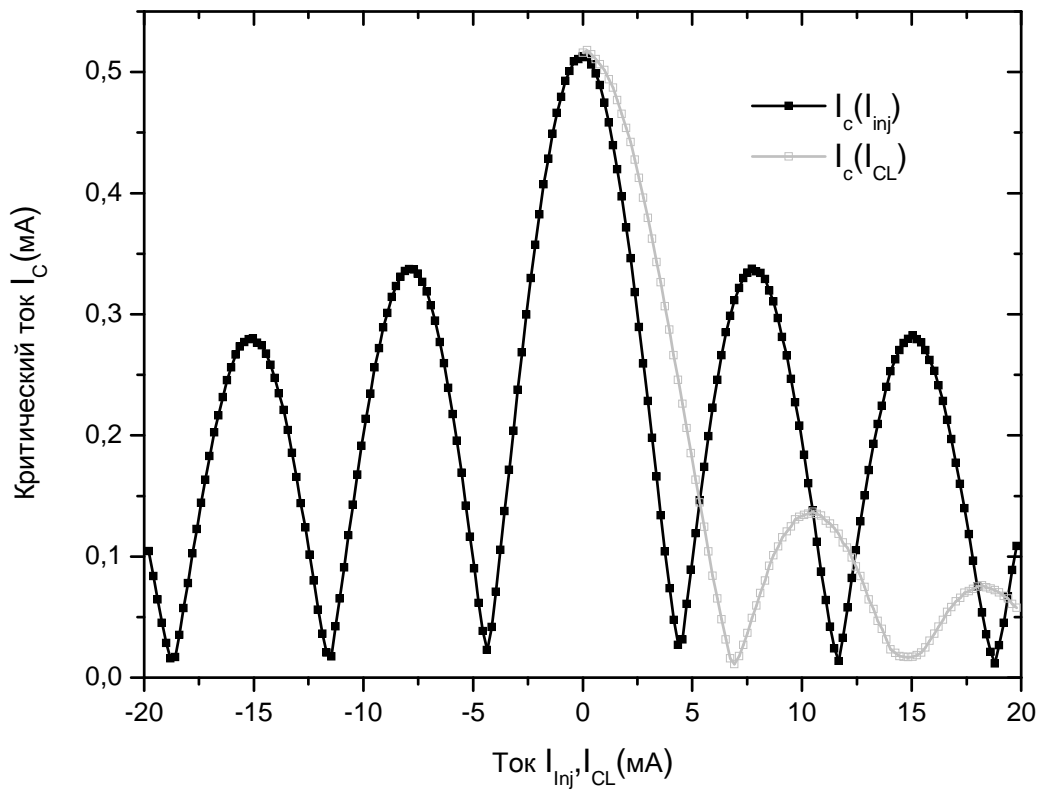


Рис. 5. Зависимости критического тока генератора от тока инжекторов(черным) и от внешнего магнитного поля (серым)

Уменьшение амплитуды по сравнению с центральным максимумом связано с конечным размером инжекторов. Для сравнения, а также для

проверки однородности РДП снималась зависимость критического тока от внешнего магнитного поля (похожая на зависимость Фраунгофера для сосредоточенного перехода, где  $L < \lambda_J$ ). На следующем этапе снималась вольт - амперная характеристика (ВАХ) генератора с током инжекторов  $I_{inj\_1} = 3.83 \text{ мА}$  (на рисунке 6 изображены две ВАХ генератора без тока через инжекторы и с  $I_{inj} = I_{inj\_1}$ ).

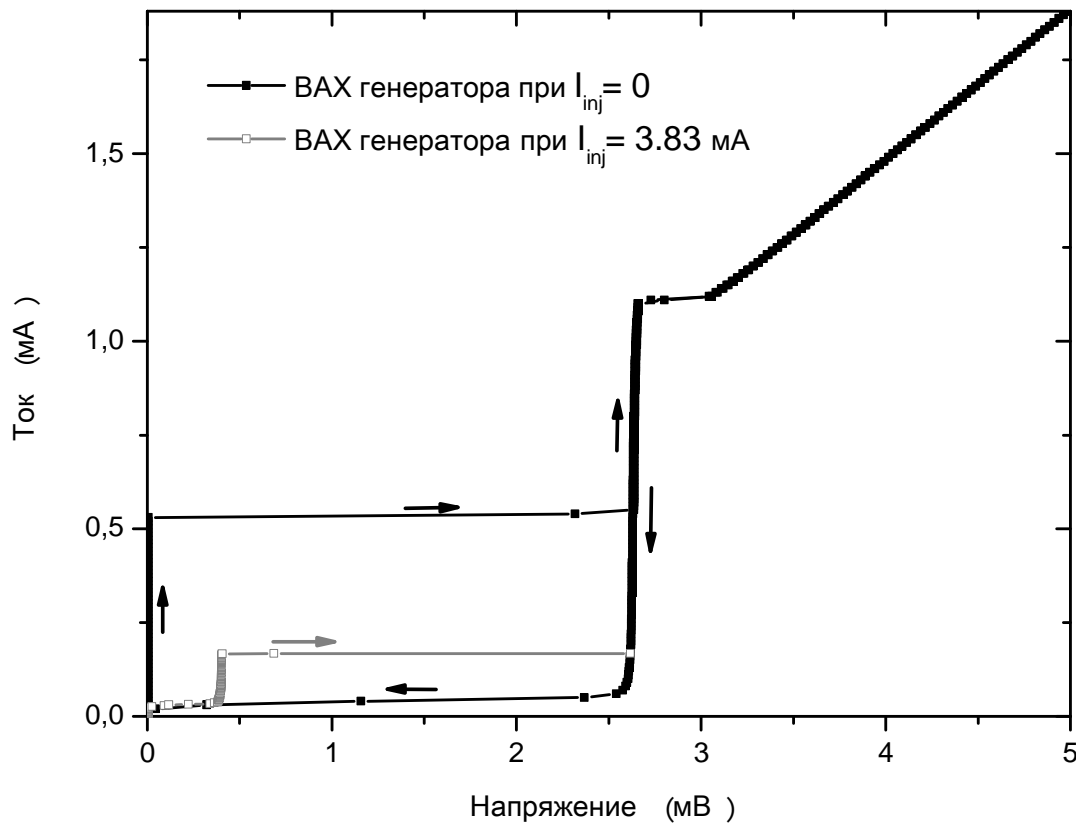


Рис. 6. График ВАХ генератора (чёрным),  
 ВАХ генератора с током инжекторов  $I_{inj\_1} = 3.83 \text{ мА}$  (серым).

Стрелками на графике показано направление измерения тока.

Как и предполагалось, на ВАХ появилась ступень. Поскольку переход достаточно короткий ( $\alpha L < 1$ ), где  $\alpha$  — безразмерный параметр затухания,



$\alpha L$  нормированная длина перехода, электромагнитная волна, возникающая при выходе флаксона, достигает противоположного края, что приводит к возбуждению геометрических резонансов.

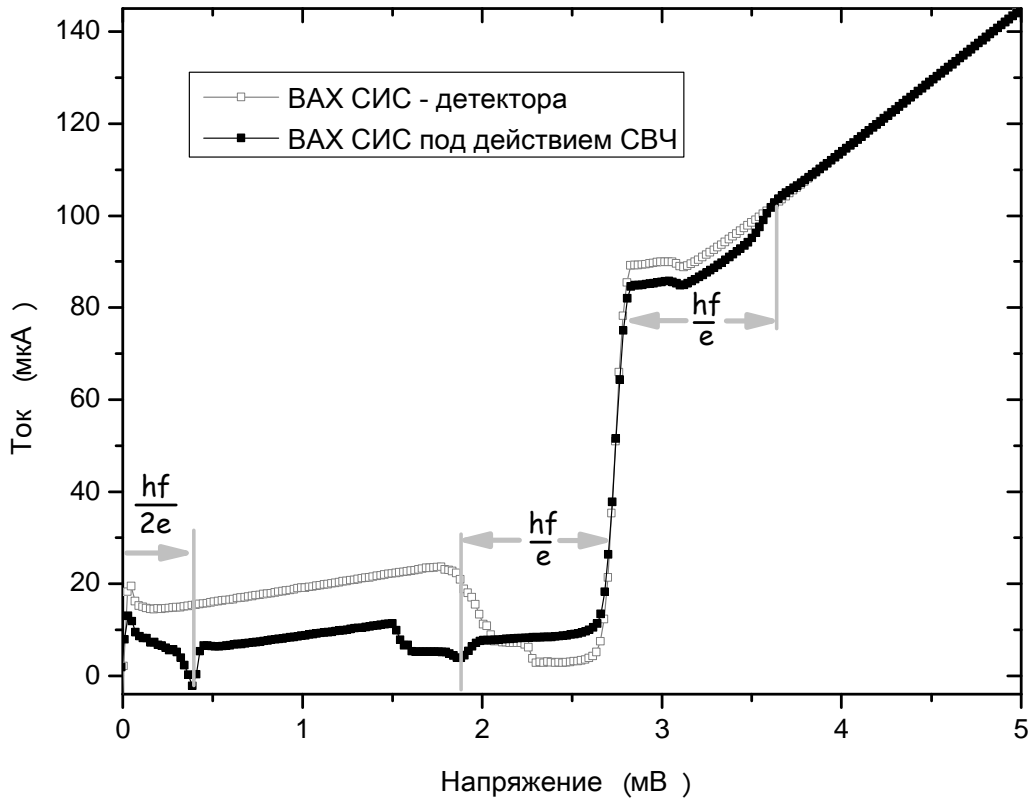


Рис.7. ВАХ СИС – детектора и ВАХ под воздействием излучения генератора

При подаче СВЧ – излучения генератора на ВАХ детекторного СИС – перехода возникают 2 типа особенностей: ступени Шапиро, связанные с синхронизацией джозефсоновской компоненты внешним сигналом гетеродина на его основной частоте и частотах гармоник (их положение определяется соотношением Джозефсона,  $V = \frac{nhf}{2e}$ ) и квазичастичные ступени, возникающие в результате вынужденного туннелирования электронов через барьерный слой изолятора под действием внешнего сигнала (англ. – photon assisted tunneling) [11] - см. рис. 7. Квазичастичные ступени на ВАХ представляют собой области изменения тока (по сравнению с «ненакачанной»

ВАХ); размер ступени по напряжению кратен  $\frac{hf}{e}$ , их положение отсчитывается от щелевого напряжения.

### СВЧ – измерения

Второй этап проводился в специальном криостате, предназначенном для СВЧ измерений и оснащённый необходимыми СВЧ линиями и фильтрами. Как и при низкочастотных измерениях к инжекторам прикладывался ток  $I_{inj1}$ , а ток питания генератора смещал рабочую точку в область ступени генерации. Далее, на СИС детектор подавался сигнал от опорного лабораторного СВЧ – генератора на частоте  $\sim 10..12$  ГГц, которая подбиралась так, чтобы N – я гармоника этого сигнала была близка к частоте генерации перехода с инжекторами ( $\sim 190$  ГГц). Нужная гармоника опорного синтезатора и сигнал на основной частоте генератора смешивались на СИС - переходе. Получающийся сигнал на разностной (промежуточной) частоте  $\sim 400$  МГц усиливался и выводился на экран спектроанализатора.

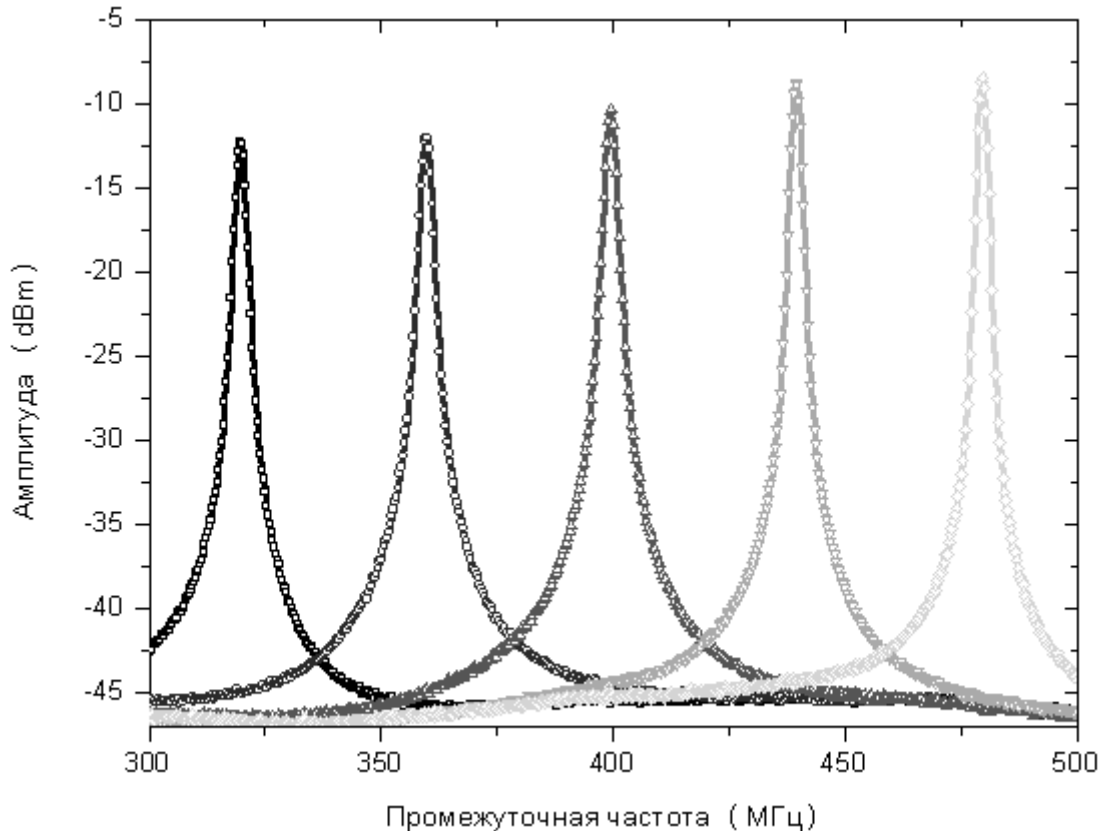


Рис. 8. Спектры излучения генератора при разных токах смещения  $I_{bias}$ .

Типичное значение ширины линии излучения составляет 1-10 МГц. На рис. 8 показаны преобразованные вниз по частоте (с помощью СИС – смесителя) спектры излучения при разных токах смещения  $I_{bias}$ . Для спектра в середине графика частота генератора равнялась 197 ГГц (ток через инжекторы 3.83 мА, ток смещения 340 мкА). Форма линии близка к Лоренцевской, её ширина составила 1.8 МГц, отношение сигнал/шум 35.5 дВ. Смеситель работал на 16 - ой гармонике опорного синтезатора с частотой 12.283 ГГц.

Были измерены зависимости 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. 9 и 10.

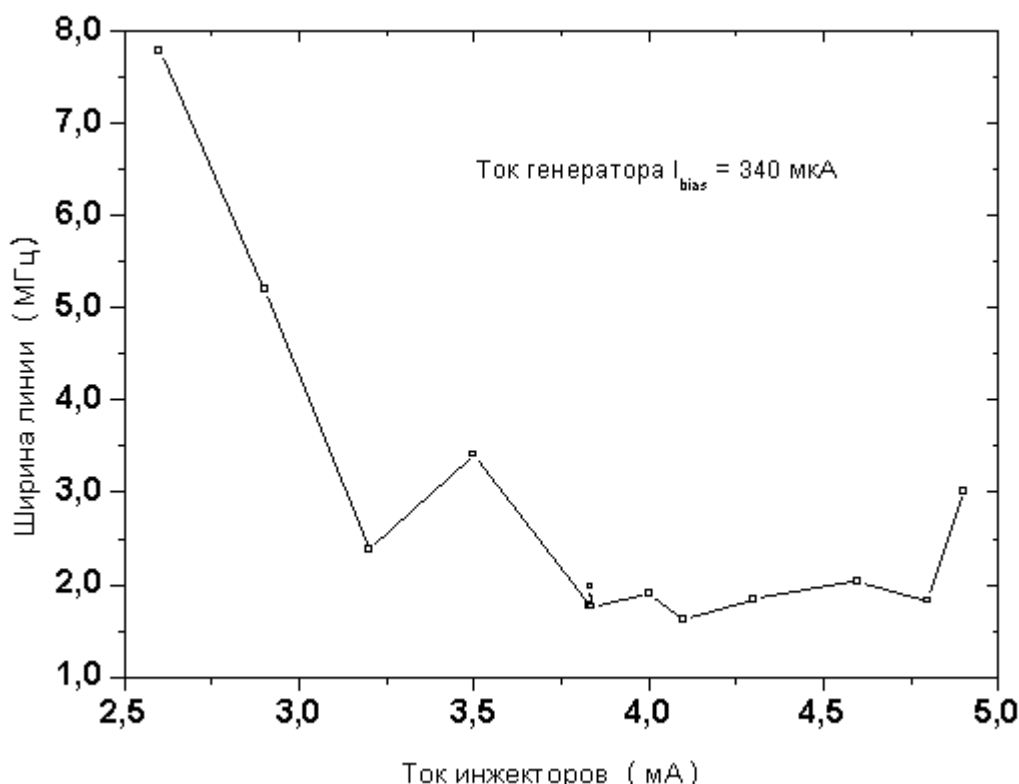


Рис. 9. График зависимости ширины линии излучения на ступени от тока инжектора  $I_{inj}$  при токе смещения  $I_{bias} = 340 \text{ мкА}$  (экспериментальные точки соединены линиями для наглядности).

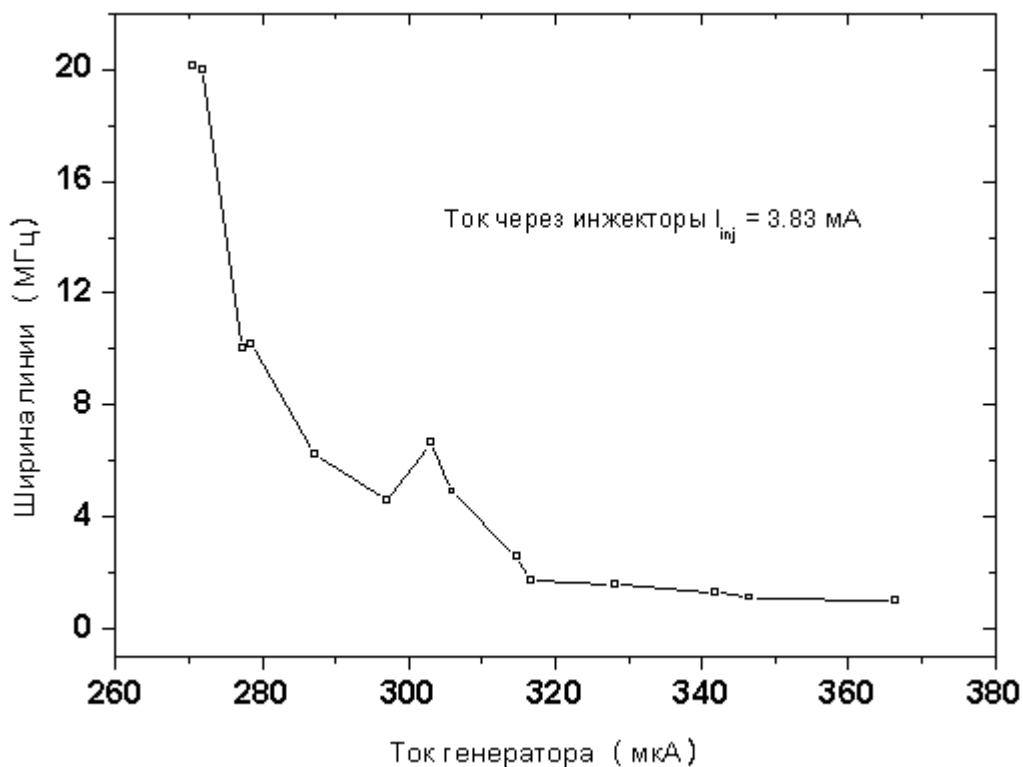


Рис.10. График зависимости ширины линии излучения генератора от тока смещения  $I_{bias}$ , измеренный при токе через инжекторы 3.83 мА (экспериментальные точки соединены линиями для наглядности).

Из графиков видно, что ширина линии излучения генератора уменьшается при смещении рабочей точки вверх по ступени. Она имеет типичные значения, реализуемые для геометрических резонансов (Фиске). Фактически генератор с инжекторами возбуждает Фиске резонансы, однако внешнее магнитное поле при этом не задается. При токе смещения 303 мкА на зависимости была замечена особенность – уширение линии излучения. Для проверки причины появления этой особенности был построен график ВАХ генератора в более крупном масштабе – области на ступени – рис.11. Причём значения напряжений были определены с высокой точностью из частот генерации по соотношению Джозефсона.

На полученной зависимости не было обнаружено никаких особенностей вблизи тока 300 мкА, поэтому появившееся уширение линии при этом токе не может быть объяснено изменение дифференциального сопротивления.

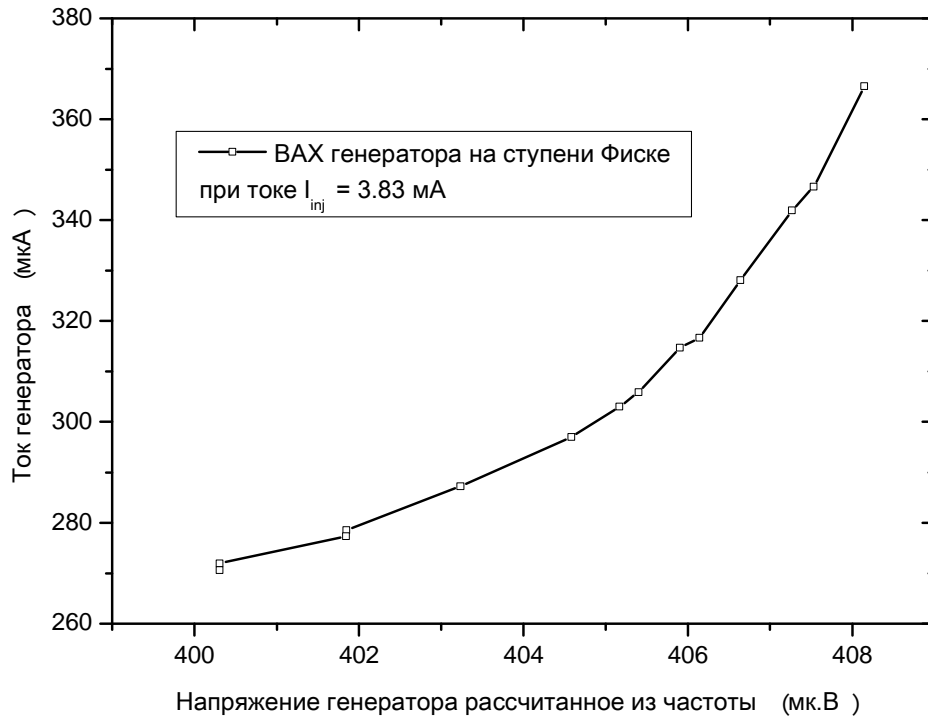


Рис. 11. ВАХ генератора в районе появления полужаксонной ступени при токе через инжекторы 3.83 мА

В завершение были проведены эксперименты по фазовой стабилизации линии излучения генератора с инжекторами с помощью системы ФАПЧ. Система является, в сущности, замкнутой радиотехнической следящей системой, в которой подстраиваемый сигнал  $r(t, \Phi_1)$  следит за опорным сигналом  $s(t, \Phi_2)$  [12-14]. Любое рассогласование фаз  $\varphi(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t)$  этих двух сигналов, лежащее в пределах полосы пропускания ФАПЧ, преобразуется на перемножающем элементе в корректирующее напряжение в линии задания тока смещения. На рисунке 12 показаны преобразованные вниз по частоте спектры излучения на частоте 209.5 ГГц: красная кривая – режим частотной стабилизации, синяя кривая – 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 %.

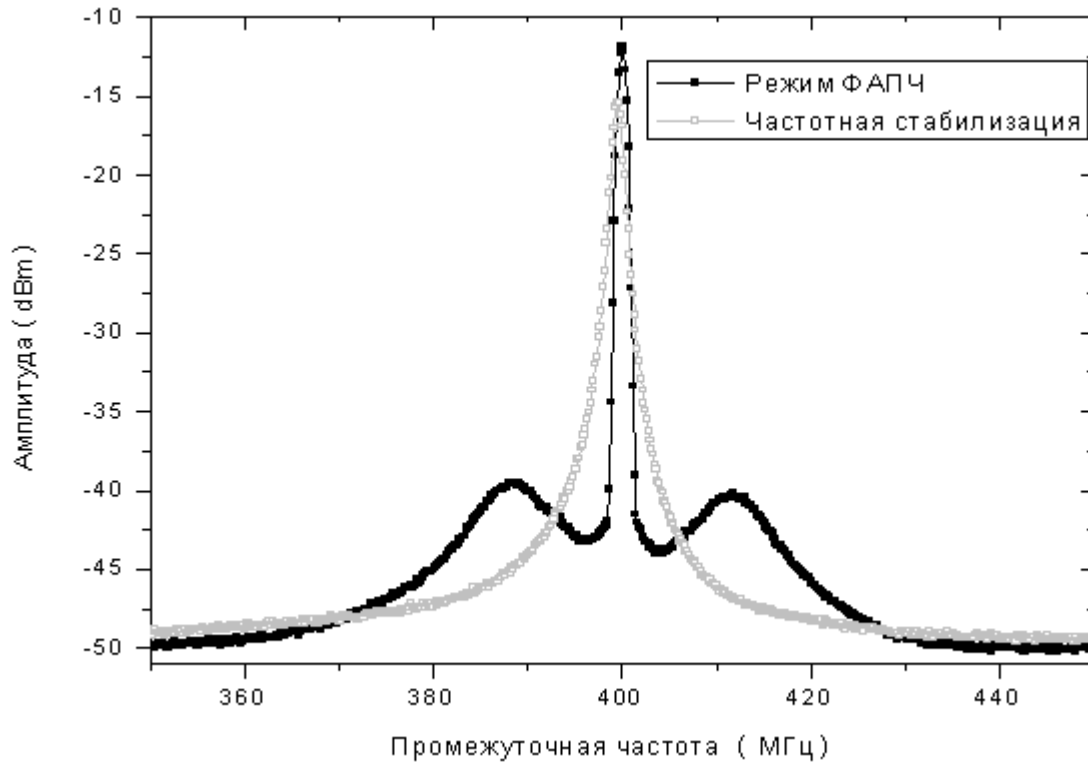


Рис. 12. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения на частоте 209.5 ГГц. Частотная стабилизация (серая кривая).  
Режим фазовой стабилизации (черная кривая).

## Выводы

Впервые были проведены исследования выходной мощности, ширины, фазовой и частотной стабилизации линии генерации джозефсоновского генератора с инжекторами, основанного на создании разрыва фазы внутри перехода. Продемонстрирована возможность перестройки частоты такого генератора. Проведенные исследования показали, генератор с инжекторами позволяет получать стабильное узкополосное излучение диапазона 100 - 300 ГГц, частота этого излучения может быть стабилизирована с помощью системы фазовой автоподстройки.

## Благодарности

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

## Литература

1. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, "Integrated Superconducting Receivers" Superconductor Science and Technology, vol 13, pp. R53-R69, (2000).
2. 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
3. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets, "Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder", Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016 (8pp), (2010).
4. J. H. Xu, J. H. Miller, Jr., and C. S. Ting, " $\pi$ -vortex state in a long  $0-\pi$  Josephson junction", Phys. Rev. B 51, 11958–11961 (1995)
5. Pfeiffer J. et al. Static and dynamic properties of  $0$ ,  $\pi$ , and  $0-\pi$  ferromagnetic Josephson tunnel junctions //Physical Review B. – 2008.–T. 77. – №. 21. – C. 214506.
6. Alexey V. Ustinov, "Fluxon insertion into annular Josephson junctions", Appl. Phys. Lett. 80, 3153 (2002)
7. E. Goldobin, A. Sterck, T. Gaber, D. Koelle, and R. Kleiner, "Dynamics of Semifluxons in Nb Long Josephson  $0-\pi$  Junctions", Phys. Rev. Lett. 92, 057005 (2004)
8. M. Paramonov, M. Yu. Fominsky, V. P. Koshelets, B. Neumeier, D. Koelle, R. Kleiner, and E. Goldobin Applied Physics Letters 104, 062603 (2014)
9. V. Koshelets, S. Kovtonyuk, I. L. Serpuchenko, L. Filippenko, and A. Shchukin, IEEE Trans. Magn. 27, 3141 (1991).

10. P. Dmitriev, I. Lapitskaya, L. Filippenko, A. Ermakov, S. Shitov, G. Prokopenko, S. Kovtonyuk, and V. Koshelets, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13, 107 (2003).
11. Tucker, J.R., M.J. Feldman, *Quantum detection at millimeter wavelengths // University of Illinois 61801*
12. В. Линдсей, Системы синхронизации связи и управления, *Советское радио*, 1978.
13. В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин, Фазовая автоподстройка частоты, *Связь*, 1996.
14. F.M. Gardner, *Phaselock Techniques, John Wiley & Sons*, 1979.