

# Криогенный фазовый детектор

К.В. Калашников, А.В. Худченко, В.П. Кошелеч

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, ул. Моховая 11, стр.7, г. Москва  
e-mail: [kalashnikov@hitegh.cplire.ru](mailto:kalashnikov@hitegh.cplire.ru)

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработан уникальный гетеродинный сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) субмм диапазона длин волн [1, 2]. Спектральное разрешение любого гетеродинного приемника определяется в основном формой линии генерации гетеродина. В качестве гетеродина в составе СИП используется длинный джозефсоновский переход (ДДП), форма линии генерации которого близка к лоренцевской кривой, причем ширина линии на полувысоте варьируется в диапазоне от сотен кГц до нескольких десятков МГц [3,4]. Для достижения высокого спектрального разрешения приемника ДДП синхронизируется с внешним высокостабильным синтезатором. Синхронизация ДДП осуществляется с помощью полупроводниковой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), находящейся вне криостата при комнатной температуре. Длинные соединительные провода, необходимые для уменьшения теплового потока в криобъем, вносят существенную фазовую задержку в сигнал обратной связи ФАПЧ, что приводит к ограничению полосы синхронизации системы. Конкретная реализация комнатной системы ФАПЧ для СИП обладает шириной полосы регулирования 12 МГц. Данная система может эффективно синхронизировать (более 90% излученной ДДП мощности) лишь достаточно узкие линии излучения (уже 2 МГц).

Дальнейшее развитие идеи СИП требует создания более эффективной, широкополосной и простой системы ФАПЧ. Так, для повышения диапазона рабочих частот СИП необходимо использовать новые типы ДДП с большими щелевыми напряжениями и, соответственно, с большей максимально возможной частотой генерации (более 1 ТГц). Ожидается, что большие поверхностные потери приведут к уширению линии генерации до десятков МГц. Такую линию уже невозможно эффективно синхронизировать комнатной системой ФАПЧ.

Использование СИП в интерферометрии также требует высокого уровня фазовой стабильности ДДП. Так, например, для проекта ALMA (интерферометр в Чили с базой около 15 км) на частоте гетеродина 600 ГГц среднеквадратичный фазовый шум должен быть менее 75 фс [5], что может быть достигнуто лишь при синхронизации более 95 % мощности излучения гетеродина во всем диапазоне рабочих частот. Данная задача также требует более эффективной системы ФАПЧ.

Ранее нами была предпринята попытка расширения полосы синхронизации системы ФАПЧ за счет использования СИС-перехода в качестве

фазового детектора [6]. Реализованная таким образом криогенная система ФАПЧ (КриоФАПЧ) показала перспективность этой идеи, удалось расширить полосу синхронизации вплоть до 40 МГц. Тем не менее, КриоФАПЧ не лишена недостатков, таких, как необходимость использования НЕМТ усилителей в тракте ПЧ, которые имеют существенные размеры (порядка 50 мм) и значительное тепловыделение (5-20 мВт), что не позволяет разместить всю систему ФАПЧ предельно компактно.

В данной работе предлагается развитие идеи КриоФАПЧ путем функционального объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе – криогенном гармоническом фазовом детекторе (КГФД), основанном на туннельном СИС-переходе. Расчет показал [7], что при приложении к СИС-переходу двух гармонических сигналов частот  $f_{Вч}$  и  $f_{синт}$  (причем  $f_{Вч} - kf_{синт} \ll f_{синт}$ ), на переходе возникает сигнал промежуточной частоты вида  $I(t) = I_{1,k} \sin(2\pi(f_{Вч} - kf_{синт})t + \varphi)$ , где  $\varphi$  и  $I_{1,k}$  - известные из расчета фаза и амплитуда сигнала соответственно. Таким образом, СИС-переход является криогенным гармоническим фазовым детектором (КГФД). Применение КГФД позволяет разместить все элементы петли ФАПЧ (ДДП, КГФД, фильтр нижних частот и необходимые соединения) на одном микрочипе, поэтому длина петли ФАПЧ может быть уменьшена практически до предела.

Идея использования КГФД для синхронизации ДДП заключается в следующем: часть сигнала ДДП частоты  $f_{ДДП}$  подается на КГФД, где смешивается с  $k$ -ой гармоникой сигнала опорного синтезатора частоты  $f_{синт}$ , причем  $f_{синт}$  подбирается так, что  $f_{ДДП} = k \cdot f_{синт}$ . При изменении мгновенной частоты ДДП возникает сигнал обратной связи, который заводится на управляющий электрод ДДП через фильтр нижних частот и изменяет мгновенную частоту генерации. Преобразованный вниз по частоте спектр излучения ДДП приведен на рис. 1.

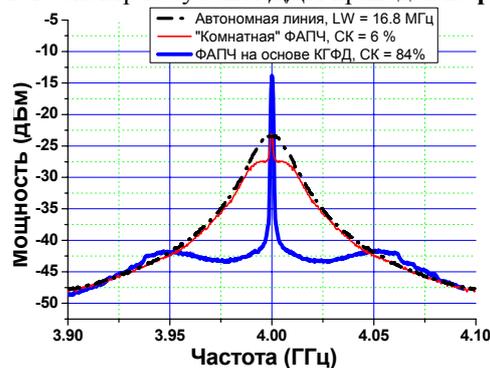


Рис.1. Экспериментально измеренные спектры излучения ДДП, преобразованные вниз с частоты 634 ГГц.

Из приведенного графика видно, что ширина полосы синхронизации системы достигает 70 МГц. При автономной ширине линии 22 МГц стало возможным синхронизировать 77% мощности излучения (доля синхронизированной мощности называется спектральным качеством, СК). Разработанная система значительно превосходит аналоги (рис. 2). Так, при аналогичной ширине линии полупроводниковая «комнатная» система ФАПЧ способна синхронизировать только лишь 2 % мощности излучения, а КриоФАПЧ – около 15%.

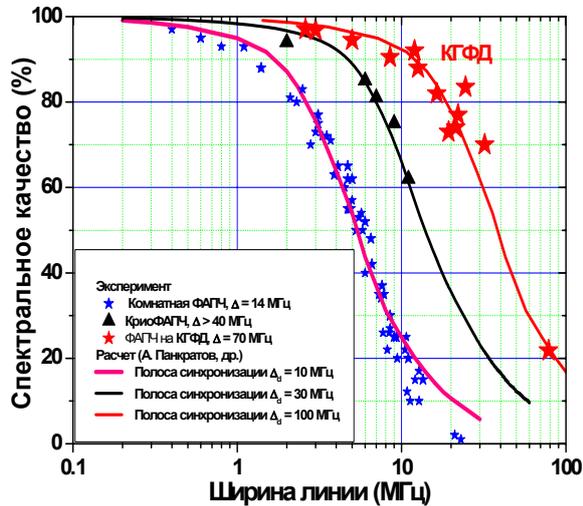


Рис.2. Теоретические (сплошные линии) и экспериментальные (точки) зависимости СК от автономной ширины линии для разных полос синхронизации.

Следует отметить, что данная концепция обладает некоторыми недостатками. Так, для наблюдения спектров, приведенных на рис. 1, мы использовали дополнительный СИС-смеситель с щелевой антенной. Такой способ может быть как неудобен, так и невозможен в реальной работе СИП. Детектирование факта синхронизации ДДП и определение качества синхронизации должно осуществляться иными методами. Один из таких методов заключается в наблюдении отклика КГФД по постоянному напряжению при малой отстройке частоты ДДП от точки синхронизации (рис. 3).

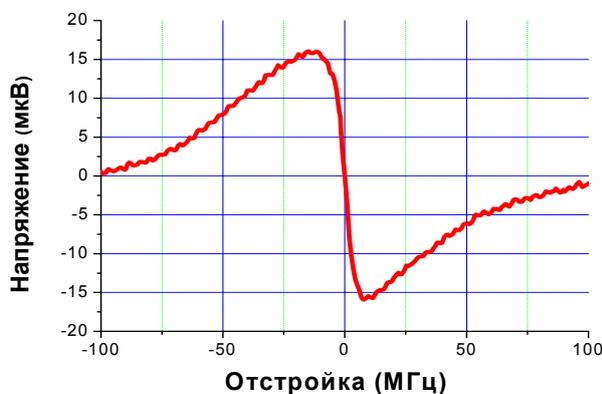


Рис.3. Отклик по постоянному напряжению КГФД при малой отстройке ДДП от точки синхронизации.

По амплитуде такого отклика мы можем судить о качестве синхронизации. То, что отклик существует только в узком диапазоне частот (в несколько раз уже, чем полоса синхронизации), говорит о недостаточности величины выходного сигнала КГФД для оптимальной работы системы ФАПЧ.

Увеличить этот сигнал можно как путем варьирования параметров КГФД (например, увеличивая его площадь, и, соответственно, ток), так и используя низкотемпературные усилители постоянного тока. Обе эти возможности обсуждаются в настоящее время.

Таким образом, показано, что в системе ФАПЧ на основе КГФД могут быть достигнуты рекордные параметры, ее простота и эффективность делают такую систему перспективной для будущих применений СИП, таких как создание СИП терагерцового диапазона, реализация матричного приемника и использование СИП в интерферометрии.

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, n. 5., pp. R53-R69.
- [2]. *Koshelets V.P. First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz / V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko et. al. // Appl. Phys. Lett.*, 1996, v. 68., p. 1273.
- [3]. *Koshelets V.P. Radiation linewidth of flux flow oscillators / V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev et. al. // Supercond. Sci. Technol.*, 2001, vol. 14, pp. 1040 - 1043.
- [4]. *Pankratov A. L. Form and width of spectral line of a Josephson Flux-Flow oscillator. / A.L. Pankratov // Phys. Rev. B*, 2001, vol. 65, p. 054504.
- [5]. *Albanna S, Brito R and Shillue B 2005 ALMA 1st LO photonic reference: status of phase drift measurements NRAOwebsite. Available: [http://www.tuc.nrao.edu/~bshillue/E2E\\_Phase\\_Drift\\_Status\\_RevB.doc](http://www.tuc.nrao.edu/~bshillue/E2E_Phase_Drift_Status_RevB.doc)*
- [6]. *Khudchenko A.V. Cryogenic Phase Detector for Superconducting Integrated Receiver / A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev et. al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 2007, vol. 17, pp. 606-608.
- [7]. *Калашников К.В. Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник / К.В. Калашников, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец // Радиотехника и электроника*, 2011, Т. 56, N. 6, стр. 751–759.