

Криогенная система фазовой автоподстройки частоты для сверхпроводникового генератора гетеродина

© А.В. Худченко, В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков

Проведено усовершенствование криогенной системы фазовой автоподстройки частоты, позволившее снизить уровень фазовых шумов на частотах менее 100 кГц.

Ключевые слова: сверхпроводник, криогенные температуры, генератор.

Результаты, полученные при реализации концепции криогенной системы фазовой автоподстройки частоты (криоФАПЧ) [1 – 3], требуют дальнейшего ее усовершенствования. КриоФАПЧ на основе криогенного фазового детектора [1, 3] предназначена для фазовой стабилизации частоты генератора гетеродина сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) субММ-диапазона длин волн [4, 5]. Микросхема СИП содержит планарную антенну, интегрированную со смесителем, основанном на туннельном переходе «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС), сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) на распределенном джозефсоновском переходе, а также второй СИС-переход – гармонический смеситель (ГС), используемый в системе синхронизации СГГ [6].

Чем шире полоса синхронизации (BW) ФАПЧ, тем большая часть мощности СГГ будет синхронизована. Процент мощности, синхронизованной в центральном пике спектра СГГ, называется спектральным качеством (СК). Остальная же часть мощности дает вклад напрямую в фазовые шумы приемника. СК тем больше, чем шире BW ФАПЧ. Оценки показывают, что для расширения частотного диапазона СИП до 1 ТГц за счет использования пленок NbN либо NbTiN (что может приводить к уширению линии СГГ) и использования СИП в интерферометрии, где требуется высокая фазовая стабильность, необходима система ФАПЧ с $BW > 50$ МГц [2].

Полупроводниковая комнатная система ФАПЧ имеет $BW = 12$ МГц [6]. Задача увеличения BW решалась путем создания принципиально новой системы КриоФАПЧ, на основе туннельного СИС-перехода [1 – 3]. Поставленная цель достигается тем, что все элементы петли КриоФАПЧ помещены вблизи СГГ внутри криостата и работают при $T = 4,2$ К, что позволяет избежать температурных перепадов в петле и минимизировать ее длину, существенно уменьшив задержки и увеличив тем самым BW системы. Для последней реализации криоФАПЧ длина петли сокращена до 50 см, что соответствует задержке 2,5 нс (рис. 1). Рабочая частота криоФАПЧ была повышена до 4 ГГц, что позволило снизить задержку в фильтре петли до 0,5 нс за счет использования реактивных элементов с меньшим номиналом. Проведенные изменения привели к увеличению BW до 40 МГц (рис. 2). Увеличение уровня фазового шума при большой отстройке от несущей (например, при смещении на 35 – 40 МГц от опоры для криоФАПЧ) типично для систем ФАПЧ. Сигнал на этой частоте изменяет свою фазу на π при прохождении по петле, что приводит к усилению фазового шума вместо его подавления. В результате получается пик фазовых шумов, который помогает оценить BW системы. Из рис. 2 видно, что рост BW приводит к расширению частотного диапазона, в котором фазовые шумы фазовосинхронизованного СГГ ниже уровня СГГ в автономном режиме генерации, и уменьшает общую долю этих шумов. Для СГГ с шириной линии 2 МГц данная криоФАПЧ способна синхронизировать 94 % мощности, в то время как полупроводниковая комнатная ФАПЧ дает лишь 82 %. Превосходство криоФАПЧ становится еще более заметным для линии шириной около 11 МГц, где криоФАПЧ дает СК = 63 %, а комнатная система лишь около 20 %.

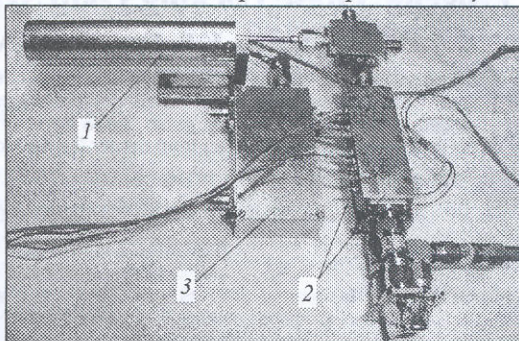


Рис. 1. Фото криоФАПЧ элементами петли: 1 – магнитный экран, содержащий СГГ и гармонический смеситель; 2 – HEMT усилители; 3 – коробка с КФД и фильтром (длина петли 50 см)

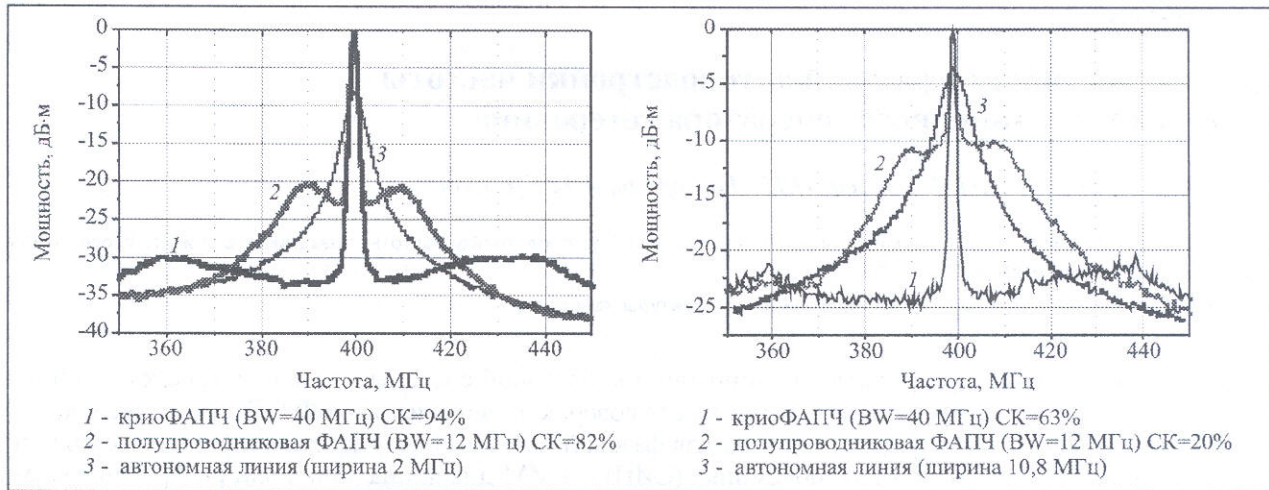


Рис. 2. Преобразованные вниз по частоте спектры ФТО: кривая 1 – фазовосинхронизованный криогенной системой ФАПЧ; кривая 2 – фазовосинхронизованный комнатной системой ФАПЧ; кривая 3 – автономная частотно-стабилизированная линия СГГ

КриоФАПЧ в предыдущих реализациях была пассивной системой ФАПЧ 1-го порядка и требовала наличие системы стабилизации частоты СГГ. Для повышения стабильности работы системы был реализован петлевой интегрирующий фильтр. Использование фильтра позволило также существенно снизить уровень фазовых шумов на частотах менее 100 кГц.

Работа поддержана частично грантами РФФИ 06-02-17206, МНТЦ № 3174, программой «NATO – Наука во имя мира» 981415 и президентским грантом для ведущих научных школ НШ 5408.2008.2.

Литература

1. Худченко А.В., Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б. Криогенный фазовый детектор. – Радотехника и электроника, 2008, т. 53, № 5, с. 624 – 629.
2. Khudchenko A.V., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Pylypenko O.M., Yagoubov P.A. Cryogenic Phase Locking Loop System for Flux-Flow Oscillator”, presented at the 19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08), Groningen, the Netherlands, April 2008, report P7-7, Program and Abstract book, p. 141.
3. Khudchenko A.V., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Yagoubov P.A., Pylypenko O.M. Cryogenic Phase Detector for Superconducting Integrated Receiver. – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2007, vol. 17, pp. 606 – 608.
4. Koshelets V.P., Shitov S.V. Integrated Superconducting Receivers, Superconductor Science and Technology, 2000, vol.13, no.5, pp. R53-R69.
5. Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Golstein H., de Graauw T., Luinge W., Schaeffer H., van de Stadt H. First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz. – Appl. Phys. Lett., 1996, vol. 68, p. 1273.
6. Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Sobolev A.S., Torgashin M.Yu., Kurin V.V., Pankratov A.L., Mygind J. Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver. – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2005, vol. 15, pp. 964-967.

Cryogenic Phase Locking Loop System for Superconducting Local Oscillator

© A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov

Cryogenic phase locking loop system with operation frequency 4 GHz and the loop length about 50 cm has been realized. The total time delay in the loop is about 4.5 ns that results in a CPLL synchronization bandwidth as much as 40 MHz. The integrating filter is placed in the loop after a cryogenic phase detector. Such a filter allows to realize a holding mode and leads to decreasing a phase noise level at frequency offset from carrier 0 – 100 kHz.

Keywords: superconductor, cryogenic temperature, local oscillator

Худченко Андрей Вячеславович (1984 г.р.) – аспирант МФТИ.

Научные интересы: радиофизика, электроника.

E-mail: khudchenko@hitech.cplire.ru

Кошелец Валерий Павлович (1950 г.р.) – докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Научные интересы: сверхпроводниковая электроника, квантовые приемники и генераторы миллиметровых волн, интегральные сверхпроводниковые структуры.

Дмитриев Павел Николаевич (1968 г.р.) – научн. сотр. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Научные интересы: сверхпроводниковая электроника, изготовление интегральных сверхпроводниковых структур

Ермаков Андрей Борисович (1960 г.р.) – канд. физ.-мат. наук, старший научн. сотр. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Научные интересы: сверхпроводниковая электроника, интегральные сверхпроводниковые структуры, автоматизированные системы измерений.