

УДК 538.945

КРИОГЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ ДЕТЕКТОР

© 2013 г. К. В. Калашников, А. В. Худченко, В. П. Кошелец

Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова РАН, Москва

E-mail: kalashnikov@hitech.cplire.ru

Работа посвящена исследованию новых элементов сверхпроводниковой электроники для криогенных систем фазовой автоподстройки частоты. Показано, что туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник может быть успешно использован в качестве криогенного фазового детектора в сверхширокополосных системах стабилизации частоты генераторов.

DOI: 10.7868/S0367676513010134

За последние годы предложено и реализовано несколько новых типов криогенных перестраиваемых генераторов (КПГ) субмиллиметрового диапазона длин волн [1–3]. Характерная особенность всех этих генераторов – то, что форма их линии излучения является лоренцевской, поскольку спектр фазовых флуктуаций генератора близок к белому шуму [4]. Применение КПГ в практических задачах требует высокой фазовой стабильности генерации, поэтому системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для эффективной синхронизации этих КПГ с внешним источником, в отличие от традиционных генераторов с более узкой гауссовской формой линии излучения, должны обладать широкой полосой регулирования.

Генератор гетеродина в сверхпроводниковом интегральном приемнике (СИП) [5, 6] на основе длинного джозефсоновского перехода (ДДП) [1] обладает диапазоном перестройки 250–750 ГГц и шириной линии излучения на полувысоте (–3дБ по мощности) от сотен килогерц до нескольких десятков мегагерц. Фазовая стабилизация ДДП в составе осуществляется с помощью системы ФАПЧ с шириной полосы синхронизации 14 МГц. Однако перспективы дальнейшего развития СИП (повышение частоты генерации ДДП до 1.2 ТГц, использование СИП в задачах радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, создание матричного приемника) требуют существенного расширения полосы синхронизации частоты генератора.

Полоса синхронизации ограничена, в первую очередь, наличием групповой задержки τ сигнала обратной связи в петле ФАПЧ. В системе с отрицательной обратной связью корректирующий сигнал направлен на подавление причины, его вызвавшей, т.е. сдвиг фаз между входом и выходом петли обратной связи равен π . Перестраиваемый генератор, как интегратор, вносит дополни-

тельный сдвиг фаз в $\pi/2$. Когда общий сдвиг фаз в петле станет равным 2π , обратная связь станет положительной и система ФАПЧ не сможет работать корректно. Положительная обратная связь приводит к возбуждению системы, что проявляется в появлении в спектре выходного сигнала характерных “рогов” на краях полосы синхронизации. Таким образом, полоса синхронизации ограничена дополнительным набегом фазы за счет конечности скорости распространения сигнала в $\pi 2$, т.е. $2\pi\Delta f\tau \approx \pi/2$.

При использовании традиционной комнатно-температурной (КТ) системы ФАПЧ сигнал ДДП сначала понижается по частоте на гармоническом смесителе (ГС) внутри криостата с сотен ГГц до 400 МГц, после чего низкочастотный сигнал усиливается и выводится из криостата на полупроводниковую КТ систему ФАПЧ. На КТ ФАПЧ происходит сравнение фазы сигнала с опорой, после чего сигнал ошибки заводится обратно в криостат, где и корректирует мгновенное значение частоты генератора. Длинные соединительные кабели используются для уменьшения теплового потока в криообъем, но приводят к появлению временной задержки сигнала обратной связи порядка 10 нс. Электронный блок ФАПЧ вносит еще 7 нс, что и приводит к ограничению полосы синхронизации КТ системы ФАПЧ для ДДП 14 МГц.

Для сокращения длины петли обратной связи необходимо создание системы ФАПЧ, работоспособной в условиях криогенных температур. Чрезвычайно высокая нелинейность туннельного перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) обуславливает его смесительные свойства [7], что делает его прекрасным кандидатом на роль ключевого элемента криогенной системы ФАПЧ – криогенного фазового детектора (КФД).



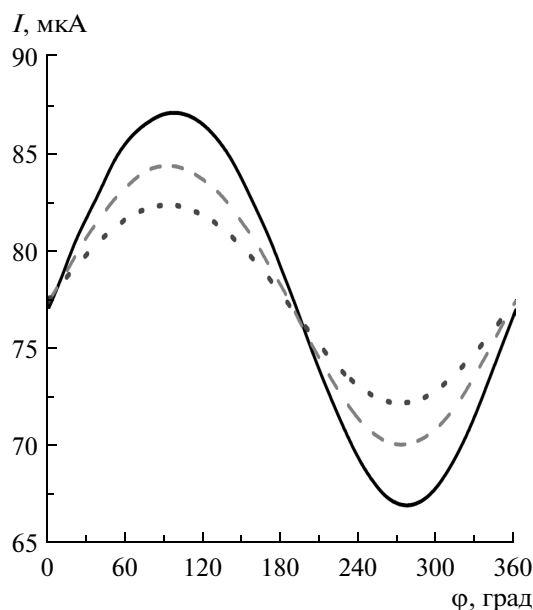


Рис. 1 Фазовый отклик СИС-перехода, три случая разных мощностей входящих сигналов, напряжение на переходе равно 2.55 мВ.

Исследования показали возможность получения синусоидального фазового отклика КФД, причем синусоидальный характер отклика сохраняется, если его амплитуда лежит в пределах примерно $0.1 I_g$ (I_g – величина скачка квазичастичного тока на щели) (рис. 1). Выходной сигнал КФД на СИС-переходе площадью 2 мкм^2 достигает -50 дБм , что соответствует амплитуде напряжения около 0.5 мВ и амплитуде тока порядка 10 мкА [8].

На основе КФД была реализована полностью криогенная система ФАПЧ, блок-схема которой показана на рис. 2.

КриоФАПЧ функционирует следующим образом: сигнал ДДП, преобразованный вниз по частоте с помощью гармонического смесителя до промежуточной частоты диапазона $0.1\text{--}1 \text{ ГГц}$, усиливается на “холодных” НЕМТ усилителях 1 и 2. Коэффициент усиления второго усилителя варьируется от 0 до 20 дБ в зависимости от управляющего напряжения, что позволяет регулировать мощность сигнала и общий коэффициент усиления в петле. Усиленный сигнал и опорный сигнал синтезатора приходят на КФД. В зависимости от расогласования фаз входных сигналов на детекторе вырабатывается выходной сигнал. Этот сигнал идет через петлевой фильтр нижних частот, основная функция которого – предотвратить проникновение сигнала промежуточной частоты диапазона $0.1\text{--}1 \text{ ГГц}$ с детектора на ДДП. Выходной сигнал фазового детектора создает корректирующее напряжение на ДДП, которое меняет мгновенную частоту и фазу генератора. В данной системе за счет сокращения петли обратной свя-

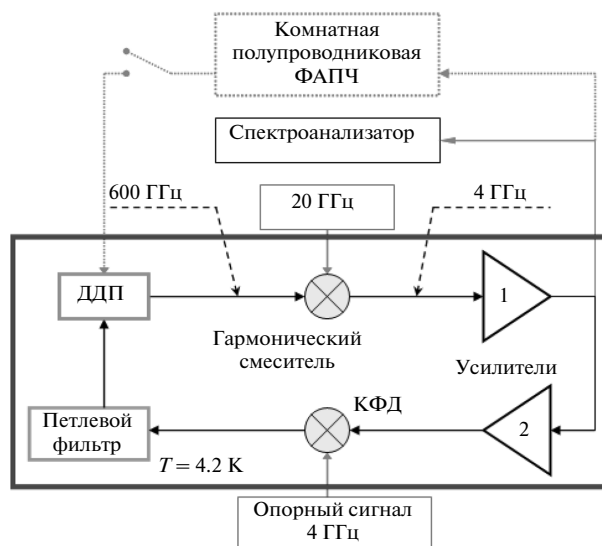


Рис. 2. Блок-схема криогенной системы ФАПЧ.

зи общая групповая задержка в петле снижена до 10 нс , что соответствует ширине полосы синхронизации в 25 МГц . С помощью КриоФАПЧ удалось синхронизировать линию излучения ДДП шириной 2 МГц со спектральным качеством (доля синхронизированной мощности, СК) более 90%. При дальнейшей разработке и оптимизации системы КриоФАПЧ удалось расширить полосу синхронизации до 40 МГц . Данные результаты показали эффективность и перспективность применения СИС-перехода в качестве КФД.

Тем не менее предложенная система не лишена недостатков. Основной из них – необходимость использования НЕМТ-усилителей в петле обратной связи, которые имеют значительное тепловыделение (до 50 мВт), что не позволяет разместить всю систему ФАПЧ предельно компактно.

Логическим продолжением концепции КриоФАПЧ явилась идея функционального объединения криогенного фазового детектора и гармонического смесителя в одном элементе – криогенном гармоническом фазовом детекторе (КГФД). Это объединение позволило упростить всю систему, отказаться от усилителей в тракте ПЧ, уменьшить длину петли и тем самым расширить полосу синхронизации системы ФАПЧ. Концепция системы синхронизации на основе КГФД заключается в следующем: часть сигнала ДДП частоты $f_{\text{ДДП}}$ подается на КГФД, где смешивается с k -ой гармоникой сигнала опорного синтезатора частоты $f_{\text{синт}}$, причем $f_{\text{синт}}$ подбирается так, что $f_{\text{ДДП}} = kf_{\text{синт}}$. При изменении мгновенной частоты ДДП возникает сигнал обратной связи, который заводится на управляющий электрод ДДП через фильтр нижних частот и изменяет мгновенную частоту генерации. Таким образом, КГФД выполняет одновременно функции двух элементов традиционной системы

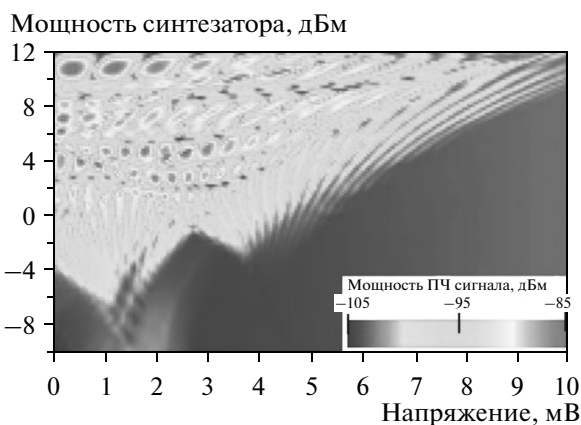


Рис. 3. Экспериментальная зависимость сигнала ПЧ от постоянного напряжения смещения и мощности сигнала синтезатора.

ФАПЧ-смесителя для преобразования вниз по частоте сигнала генератора и фазового детектора.

Для эффективного функционирования КГФД в составе ФАПЧ его выходной сигнал в рабочей точке должен быть максимизирован. Удобной для выбора такой точки оказалась зависимость выходного сигнала от постоянного напряжения смещения и мощности сигнала синтезатора, которая была исследована теоретически и экспериментально [9]. На рис. 3 изображен экспериментальный график $P_{ПЧ}(V_0, P_{сигн})$ СИС-перехода Nb–AlO_x–Nb площадью 1 мкм² с щелевым напряжением 2.8 мВ и с величиной скачка тока на щели около 100 мкА. Джозефсоновская компонента тока СИС-перехода была подавлена внешним магнитным полем. Смешивалось два сигнала частот: 635 и 18 ГГц, измерялась мощность сигнала ПЧ: 4 ГГц. Максимальная мощность сигнала ПЧ равна –90 дБм.

Теоретически показано, что при нулевом напряжении смещения через переход сигнал ПЧ обращается в ноль при нечетных k , а при четных положителен. Отсюда следует, что в работе следует выбирать именно четные гармоники сигнала опорного синтезатора, поскольку в эксперименте часто бывает удобно работать именно при нулевом смещении.

Система ФАПЧ на основе КГФД для ДДП была экспериментально реализована. Поскольку все элементы петли ФАПЧ (КГФД, фильтр нижних частот и необходимые соединения) были расположены в непосредственной близости от ДДП, групповая задержка составила менее 4 нс. На рис. 4 приведены спектры автономной линии генерации ДДП, а также спектр ДДП, стабилизированный с помощью КГФД.

Из приведенного графика видно, что ширина полосы синхронизации системы составляет около 70 МГц. При автономной ширине линии достигнута синхронизация 84% мощности излуче-

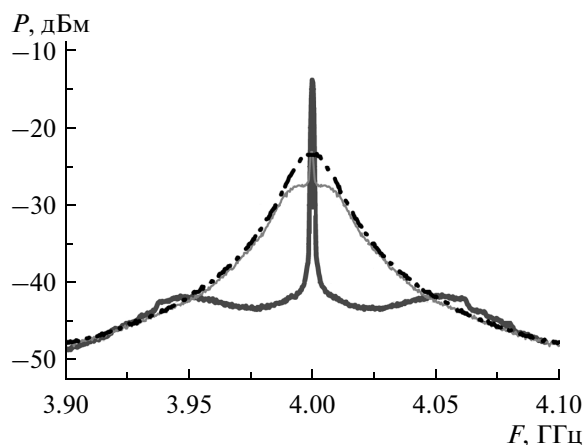


Рис. 4. Экспериментально измеренные спектры излучения ДДП, преобразованные вниз с частоты 634 ГГц. Штрихпунктирная линия – автономный спектр генерации ДДП, ширина линии 16.8 МГц; тонкая линия – спектр ДДП, синхронизированный с помощью “комнатной” ФАПЧ, спектральное качество 6%; жирная линия – спектр ДДП, синхронизированный с помощью ФАПЧ на основе КГФД, спектральное качество 84%.

ния. При автономной ширине линии 22 МГц стало возможно синхронизовать 77% мощности излучения.

Для наблюдения спектров, приведенных на рис. 4, мы использовали дополнительный СИС-смеситель с щелевой антенной. Однако такой способ может быть неудобен, а в некоторых случаях и невозможен, например при 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. 5).

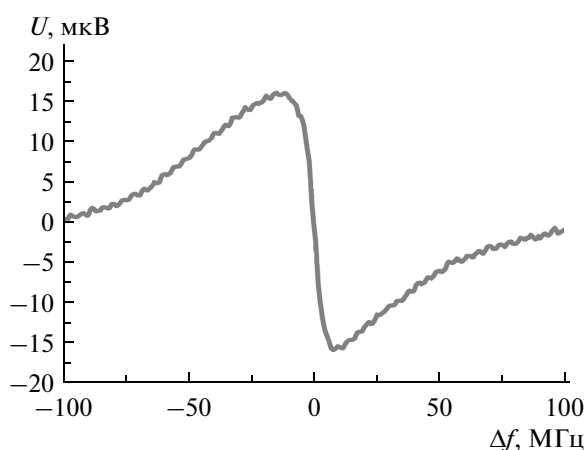


Рис. 5. Отклик по постоянному напряжению КГФД U при малой отстройке ДДП от точки синхронизации Δf .

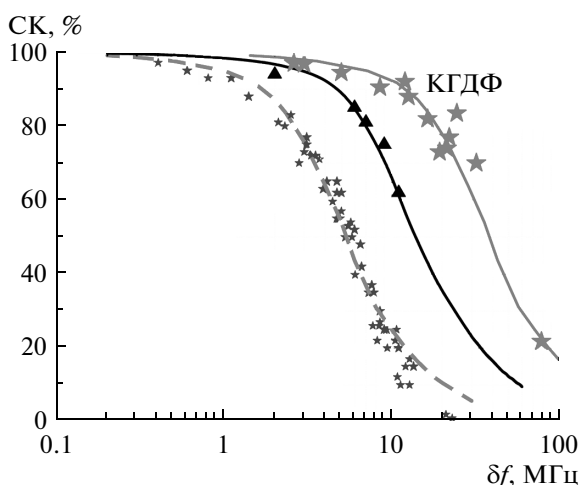


Рис. 6. Зависимости СК от автономной ширины линии δf для разных полос синхронизации Δ . Теоретические (штриховая линия – $\Delta = 10$ МГц; темная линия – $\Delta = 30$ МГц; светлая линия – $\Delta = 100$ МГц) и экспериментальные (малые звездочки – “комнатная” ФАПЧ, $\Delta = 14$ МГц; треугольники – КриоФАПЧ, $\Delta > 40$ МГц; большие звезды – ФАПЧ на КГФД, $\Delta = 70$ МГц) данные.

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, который определяет величину сигнала обратной связи), так и использованием низкотемпературных усилителей постоянного тока. Обе эти возможности изучаются в настоящее время.

Разработанная система значительно превосходит аналоги (рис. 6) [10]. Так, при ширине линии 10 МГц система ФАПЧ на основе КГФД способна

синхронизировать более 90% мощности ДДП, тогда как полупроводниковая “комнатная” система ФАПЧ только 20% мощности излучения, а КриоФАПЧ – около 60%.

Таким образом, показано, что туннельный СИС-переход может быть успешно использован в криогенных системах ФАПЧ в качестве фазового детектора. Его малый размер, низкое тепловыделение (менее 10^{-6} Вт) и высокие смесительные свойства позволяют конструировать сверхкомпактные, а значит, и сверхширокополосные системы ФАПЧ. Простота и эффективность делают системы ФАПЧ для стабилизации ДДП перспективными для многих практических применений, таких как создание СИП терагерцового диапазона, реализация матричного приемника и использование СИП в радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1983. № 54. P. 3302.
2. Faist J., Capasso F., Sivco D.L. et al. // Science. 1994. V. 264. № 5158. P. 553.
3. Ozyuzer L., Koshelev A.E., Kurter C. et al. // Science. 2007. V. 318. P. 1291.
4. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Т.1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
5. Koshelets V.P., Shitov S.V. // Supercond. Sci. Technol. 2000. № 13. P. R53.
6. Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. № 68. P. 1273.
7. Tucker J.R. // IEEE J. Quantum Electron. 1979. V. QE-15. № 11. P. 1234.
8. Khudchenko A.V., Koshelets V.P., Dmitriev P.N. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17. P. 606.
9. Калашников К.В., Худченко А.В., Кошелец В.П. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 6. С. 751.
10. Pankratov A.L., Vaks V.L., Koshelets V.P. // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 0629.