

ОТЗЫВ

Официального оппонента кандидата физико-математических наук Соловьева Игоря Игоревича на диссертационную работу Калашникова Константина Владимировича «Криогенный гармонический фазовый детектор и система фазовой автоподстройки частоты на его основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Диссертационная работа Калашникова К. В. посвящена исследованию и оптимизации криогенного гармонического фазового детектора (КГФД) на основе туннельного (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник - СИС) джозефсоновского контакта и разработке на его основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). СИП, созданный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, и работающий в частотном диапазоне 450-750 ГГц, обладает уникальными характеристиками (высокой чувствительностью, низкой шумовой температурой, широким диапазоном перестройки), которые позволили успешно использовать его в качестве бортового спектрометра в составе международной миссии TELIS по исследованию спектральных линий некоторых атмосферных газов. Однако, для ряда задач, например проектов "ALMA" и "Миллиметрон" в области интерферометрии, требуется дальнейшее улучшение характеристик СИП в частности понижения уровня фазовых шумов. Для достижения требуемых характеристик необходимо синхронизовать более 95% мощности излучения гетеродина, входящего в состав СИП, что может быть реализовано с помощью широкополосных систем ФАПЧ. К сожалению, традиционные системы ФАПЧ, использующие полупроводниковое оборудование вне криообъема, не могут решить эту задачу из-за больших размеров петли обратной связи, определяющих задержку прихода компенсирующего сигнала на гетеродин, и, в конечном счете, ширину полосы синхронизации. Для решения этой проблемы ранее уже была предпринята попытка создания полностью криогенной системы ФАПЧ. В этой системе сигнал генератора сначала понижался на гармоническом СИС-смесителе до промежуточной частоты, а затем усиливался НЕМТ-усилителем и сравнивался с сигналом опорного синтезатора на фазовом детекторе, роль которого выполнял туннельный СИС-переход, выходной сигнал которого, усиливался еще одним НЕМТ-усилителем и прикладывался к управляющему электроду генератора, меняя тем самым его мгновенную частоту. Данный подход позволил продвинуться в решении задачи, но оказался недостаточным. Основным его недостатком является необходимость использования двух НЕМТ усилителей в петле обратной связи, которые имеют значительные размеры и не позволяют расположить всю систему ФАПЧ достаточно компактно, а кроме того обладают значительным тепловыделением. Естественным продолжением идеи криогенной системы ФАПЧ является сокращение петли обратной связи за счет объединения функций гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе - криогенном гармоническом фазовом детекторе, исследованию которого и посвящена работа.

В своей работе автор отвечает на два основных вопроса: 1) сможет ли джозефсоновский СИС контакт совместить в себе функцию и гармонического смесителя и фазового детектора, и 2) какие параметры оптимальны для работы нового элемента и как, в случае его использования, осуществлять контроль за качеством синхронизации.

На мой взгляд, данная работа обладает очевидной практической значимостью. В результате усилий Калашникова К. В. удалось ощутимо улучшить характеристики работы уникального устройства – СИП - что может позволить в дальнейшем использовать его как в самых передовых научных проектах, так и в области медицины, и сфере безопасности.

Необходимо отметить, что автором был проделан большой объем работ, как в теоретической области, так и в области эксперимента. В процессе исследования был

выполнен расчет отклика СИС-перехода на бигармоническое воздействие в рамках его квантово-механического описания, выполнено моделирование КГФД в программном комплексе Matlab, а затем полученные результаты проверены путем экспериментального исследования на большом количестве образцов. Результаты неоднократно докладывались на международных симпозиумах и конференциях, и хорошо известны научной общественности. Такой полноценный подход к исследованию, а также положительные отзывы на опубликованные работы безусловно свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

Диссертация написана в хорошем стиле, понятным языком и снабжена достаточным количеством иллюстраций.

В первой главе диссертации представлен обзор направлений практического и научного использования ТГц излучения. Описана концепция СИП, которая заключается в объединении на одной микросхеме приемной антенны, маломощного СИС-смесителя, сверхпроводникового генератора гетеродина на основе длинного джозефсоновского перехода и гармонического СИС-смесителя для системы ФАПЧ, которая в оригинальной конструкции осуществлена за счет использования полупроводниковых компонент вне криообъема. Рассмотрены основные направления развития концепции СИП, требующих существенного улучшения ряда параметров приемника, в том числе совершенствования системы ФАПЧ. Дан обзор существующих систем ФАПЧ для различных криогенных генераторов терагерцового диапазона, обсуждены их преимущества и недостатки. Сформулирована постановка задачи и цели диссертационной работы.

Вторая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию свойств туннельного СИС-перехода в режиме гармонического смесителя. Рассчитаны зависимости мощности выходного сигнала промежуточной частоты от параметров приложенных сигналов. Проведен анализ возможности объединения гармонического смесителя и фазового детектора в одном элементе – туннельном СИС-контакте.

В третьей главе рассмотрена численная модель систем ФАПЧ, в том числе и на основе КГФД, обсуждаются основные параметры и закономерности работы систем ФАПЧ, определена максимально допустимая временная задержка сигнала в петле обратной связи. Описана реализация системы ФАПЧ на основе предложенного КГФД и проведено сравнение ее характеристик с аналогами.

Заключительная четвертая глава посвящена исследованию режимов работы и оптимизации КГФД для работы в системе криогенной ФАПЧ. В частности, предложен способ наблюдения и оценки качества синхронизации в системе ФАПЧ на основе КГФД. Исследован джозефсоновский и квазичастичный режим работы КГФД. Проведена оптимизация КГФД по размеру СИС-контакта.

Представленная работа оставляет ощущение законченного, практически важного исследования, а полученные результаты не оставляют сомнений в том, что автор является высококвалифицированным специалистом – физиком экспериментатором.

Возвращаясь к описанию диссертационной работы, можно сделать несколько замечаний, относящихся не к самим полученным результатам, а к их представлению.

- 1) Описание не лишено некоторых ошибок оформления. Так, например, на стр. 22, рис. 1.9. используются аббревиатуры FFO, НМ, значение которых хотя и широко известно из литературы, однако не приведено в списке используемых сокращений и не введено в текст. То же касается используемых индексов в формулах (например, стр. 41). Так же на стр. 50, рис. 3.4. не дана расшифровка обозначений блоков, используемых в модели системы ФАПЧ в программном комплексе Matlab.
- 2) Присутствуют опечатки: стр. 23, 44, 45.
- 3) Прочтение некоторых тезисов работы оказывается затрудненным из-за отсутствия предварительного описания используемых понятий. Например, на стр. 10 при описании рис. 1.2 написано «Спектр генерации ДДП, синхронизированный

комнатной системой ФАПЧ, а также автономная линия генерации ДДП представлены на рис. 1.2», в то же время в подписи к рисунку написано: «Экспериментально измеренные спектры излучения ДДП в режиме частотной стабилизации (синяя кривая) и фазовой синхронизации (красная кривая) ...», что ставит вопрос о природе частотной стабилизации автономной линии ДДП, не рассмотренный в тексте. Так же на стр. 53 упоминается выражение «... амплитуды фазового детектора в единицах частоты...» без объяснения данных единиц.

- 4) Прочтение первых глав диссертации затруднено отсутствием описания соотношения функционала рассматриваемых устройств гармонического смесителя (ГС) и гармонического фазового детектора (ГФД). Вместо предмета исследования – ГФД – следует подробное описание характеристик ГС, и только в середине диссертации проводится анализ возможности их функционального объединения в рамках единой структуры, что может быть отнесено к некоторой непоследовательности изложения.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей положительной оценки рецензируемой диссертационной работы.

Работа представляет собой законченное, хорошо известное исследование, в процессе которого было опубликовано 20 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Автореферат правильно отражает основное содержание и выводы диссертационной работы. Представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Калашников Константин Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Старший научный сотрудник
ОМЭ НИИЯФ МГУ
кандидат физ.-мат. наук

Соловьев И.И.

Подпись Соловьева И.И. заверяю
Зам. директора НИИЯФ МГУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор



01.12.2014г.

Саврин В.И.

Оппонент

Соловьев Игорь Игоревич, к.ф.-м.н., защитил диссертацию по специальности 01.04.04 – физическая электроника; почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, НИИЯФ МГУ; тел.: +7 (495) 939-2588; email: isol@phys.msu.ru; место работы - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына; старший научный сотрудник отдела микроэлектроники.