

**ПРИМЕНЕНИЕ pHEMT-ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ БАЛАНСНОГО ГЕТЕРОДИНА
ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЧАСТОТЕ 28 ГГц**

Ю. Г. КСЕНОФОНТОВ¹, С. К. ЦОЙ²

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

²ООО «ЕВРУС»
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

E-mail: ksenofontov.ura@mail.ru, savvatsoy@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена схема балансного гетеродина с использованием pHEMT-транзисторов на основе GaAs. Она предназначена для приемопередатчиков, работающих в миллиметровом диапазоне на частоте 28 ГГц, предполагаемом для использования в исследовательских целях беспроводной мобильной связи 5G. Рассмотренный вариант реализации обладает диапазоном настройки частоты в 2,4 ГГц (порядка 8,8% от центральной частоты), выходной мощностью в 9 дБм и малыми вносимыми шумами.

Annotation. The scheme of balanced heterodyne using GaAs-based pHEMT-transistors is reviewed. It is intended for a transceiver, which is designed to work in the millimeter range at the frequency of 28 GHz, which is supposed to be used for 5G wireless mobile communication exploring. The reviewed circuit has a frequency tuning range of 2.4 GHz (about 8.8% of the center frequency), output power of 9 dBm and low insertion noise.

Введение

На сегодняшний день развитие радиосвязи направлено на изучение СВЧ диапазона. Такой интерес во многом связан с исследованием беспроводной мобильной связи 5G. Так согласно [1] в РФ планируется выделить полосу частот от 6 до 30 ГГц в целях изучения технологии 5G, а также развития сетей следующих поколений. В основном, рассматривается вариант использования частот в диапазоне 28 ГГц. Такие страны как Южная Корея, Япония и Китай под исследования 5G уже задействуют частоты от 26 ГГц до 29 ГГц. Разработка приемопередатчиков для работы на таких высоких частотах является важной и, в то же время, сложной задачей радиотехники.

Любой приемопередатчик в своей работе задействует схему гетеродина. Существует множество таких схем, главным элементом которых часто выступают варакторы. Проблема таких гетеродинов, что они предназначены для приемопередатчиков, работающих в низкочастотных диапазонах волн, а те схемы, что представлены для миллиметрового диапазона, обладают малым покрытием частотного диапазона, вместе с тем вносят большие фазовые шумы. Решение такой проблемы было найдено в использовании низкочастотных генераторов на биполярных транзисторах, с последующим умножением частоты, однако такой подход сильно отражается на габаритных размерах гетеродина. Использование pHEMT-транзисторов в схеме гетеродина способно решить вышеперечисленные проблемы.

Технология pHEMT (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) – создание псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов. Базируется pHEMT на полевом транзисторе, где поток носителей заряда осуществляется между истоком и стоком, а непосредственно управление потоком происходит посредством электрического поля, приложенного к затвору. Высокая подвижность электронов обеспечивается за счет гетероструктуры, поэтому pHEMT иначе называют полевыми транзисторами с гетероструктурой. Основные требования к разработке таких транзисторов – уменьшение сопротивления при включенном состоянии и минимизация емкости в режиме отсечки [2].

Ни одна система связи не обходится без использования гетеродина, чьи характеристики напрямую влияют на работу всей схемы, поэтому проектирование гетеродина для миллиметрового диапазона является важнейшей задачей при конструировании СВЧ-техники. Частота гетеродина используется в качестве опорной для преобразования РЧ-сигнала в промежуточную частоту. Схемы гетеродина с использованием pHEMT-транзисторов, на сегодняшний день, являются крайне перспективными в разработке схем для изучения миллиметрового диапазона частот.

В результате создания гетероструктуры, образуется область свободного перемещения носителей заряда между полупроводниками [3]. Гетероструктуры позволяют управлять шириной запрещенной зоны и подвижностью носителей заряда, что в свою очередь напрямую отражается на быстродействии транзисторов, использующих такую технологию. За счет высокой подвижности и отсутствию столкновений между носителями, такие транзисторы обладают низким уровнем шумов, и могут быть использованы для работы в ВЧ диапазоне.

Схема гетеродина

За основу была взята схема генератора Колпитца. Частота колебаний такого генератора определяется классической формулой:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Упрощенная схема гетеродина [4, 5], собранного на основе GaAs pHEMT-транзисторов (рис. 1) PH15, производства UMS foundry [6]. Длина затвора каждого из транзисторов равна $4 \times 0,15$ мкм, ширина – 20 мкм. Активная часть объединяет в себе два pHEMT-транзистора VT₃ и VT₄. Смещение транзисторов осуществляется за счет источников питания V₁=2В и V₂=0,2В. Индуктивности L_{in} и L₄ используются в качестве нагрузки для транзисторов. Индуктивность L₁ совместно с двумя варакторами VT₁ и VT₂ представляют собой резонатор. Варакторы VT₁ и VT₂ построены на pHEMT-транзисторах методом замыкания истока и стока. Емкость варакторов регулируется подачей на затвор напряжения V_{in}. Конденсатор C₁ обеспечивает фильтрацию по постоянному току.

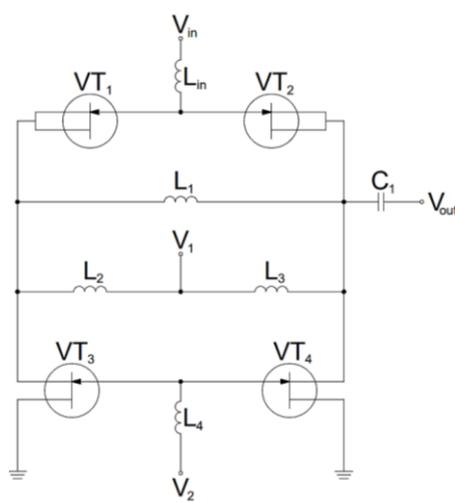


Рис. 1. Схема гетеродина на базе pHEMT-транзисторов

Моделирование

В ходе симуляции схемы особое внимание уделялось проверке симметричности расположения элементов, чтобы избежать асимметрии в колебаниях, предотвращая тем самым возникновение дополнительных фазовых шумов. Имитация схемы производилась с помощью программного обеспечения AWR Design Environment. С момента запуска системы, амплитуда колебаний напряжения (В) от времени (нс) имеет очень высокую стабильность (рис. 2).

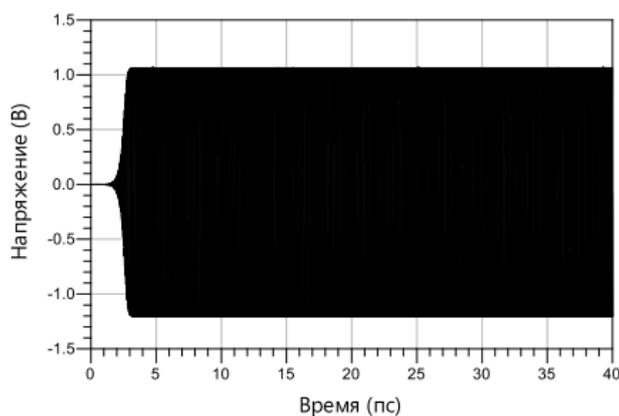


Рис. 2. Изменения выходного сигнала при Vin = 2В

Выходная мощность первой гармоники составляет от 5,02 дБ до 9,75 дБм, в то время как нежелательные вторая и третья гармоники сильно подавляются (рис. 3). При изменении напряжения V_{in} от -2В до 2,5В, частота колебаний изменяется в диапазоне от 28,9 ГГц до 26,5 ГГц (рис. 4). Следовательно диапазон частоты настройки такого гетеродина составляет 2,4 ГГц.

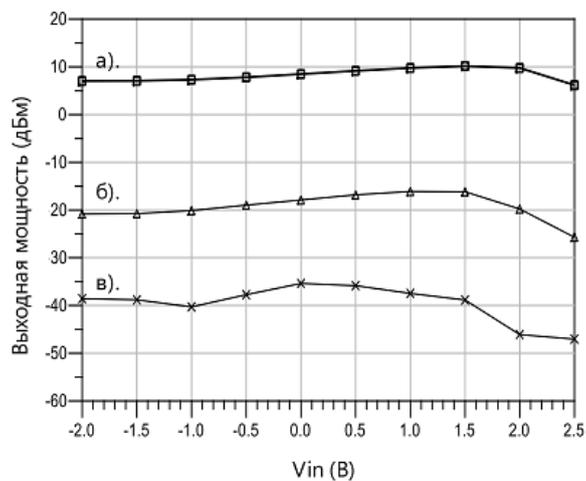


Рис. 3. Выходная мощность (дБм): (а) первой, (б) второй и (в) третьей гармоник

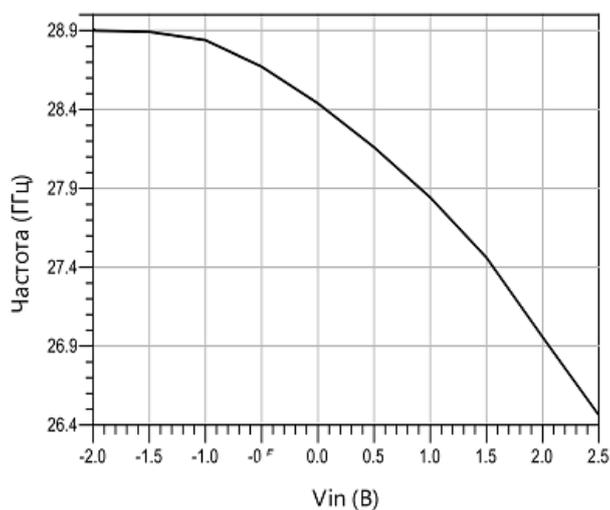


Рис. 4. Изменения частоты в зависимости от V_{in}

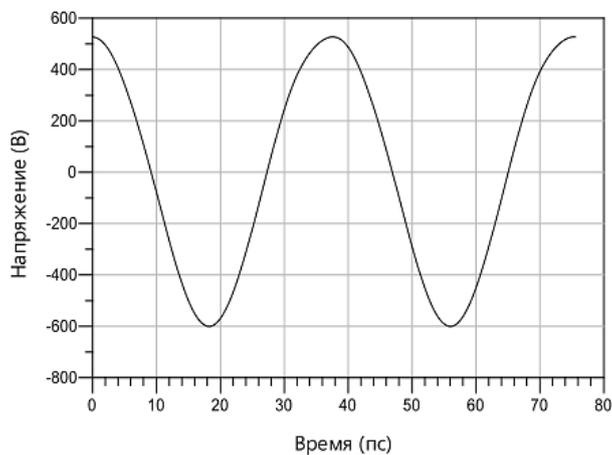


Рис. 5. Сигнал на выходе при $V_{in} = 2,5$ В

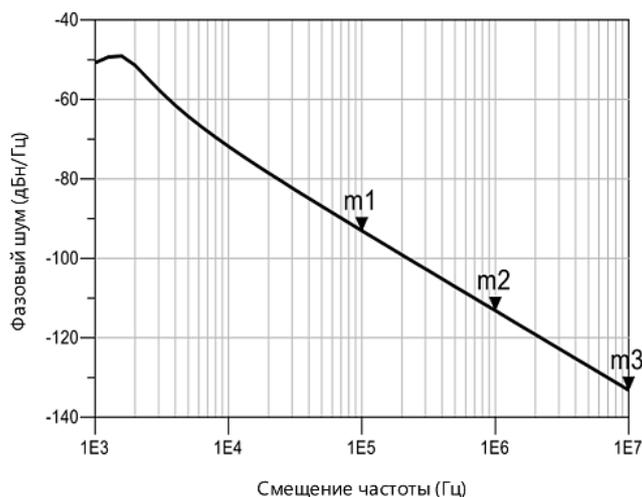


Рис. 6. Однополосный фазовый шум

На рисунке 6 изображен график зависимости фазового шума от смещения частоты, где точкам m1, m2 и m3 соответствуют значения частоты 100 кГц, 1 МГц, 10 МГц и фазового шума -93 дБн/Гц, -113 дБн/Гц, -133 дБн/Гц соответственно.

Заключение

Таким образом, была предложена схема гетеродина на основе рНЕМТ-транзисторов, которая при моделировании доказала свою пригодность для работ в устройствах миллиметрового диапазона, в частности, на частоте 28 ГГц. Охватываемая полоса частот составляет 8,8% от центральной частоты, что является достаточно высоким показателем. При максимальной выходной мощности схемы (9 дБм) значения фазовых шумов являются крайне малыми. Сигнал на выходе гетеродина соответствует почти идеальному синусоидальному сигналу. Представленный вариант схемы обладает относительно малыми габаритами вследствие отсутствия необходимости в использовании дополнительных каскадов умножения частоты выходного сигнала, и может быть задействована в приемопередатчиках СВЧ диапазона.

Список использованных источников

1. Правительство Российской Федерации. Распоряжение № 3339-р. Москва, 2023. – 28 с.
2. Бабак Л.И., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И. Разработка GaAs и SiGa СВЧ монолитных интегральных схем. Электронная техника. Сер.3: Микроэлектроника. 2015. № 4. С4-17.
3. Алфёров Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии//Успех физических наук: сборник научных докладов. Т.172, №9. – С.1072-1076. 2002..
4. Марков Ю.В., Боков А.С. Проектирование устройств приема и обработки сигналов. Екатеринбург, 2015. – С.75-78.
5. Subhash C. Microwave Active Devices and Circuits for Communication/C. Subhash – Luxembourg: Springer, 2019. – pp.115-145.
6. UMS Foundry service. 170112_DS GaAs PH15 datasheet [Электронный ресурс].URL: <https://www.ums-rf.com/wp-content/uploads/2017/05/PH15.pdf> (дата обращения 03.11.2024).