

УДК 001.891.573

**Исследование влияния формы ВАХ нелинейного элемента на параметры
субгармонического смесителя радиосигналов.**

Григорьева Александра Анатольевна

МГТУ им. Н.Э. Баумана

sgrigoryeva@gmail.com

Смесители, осуществляющие преобразование частоты из одной части радиодиапазона в другую, широко используются в аппаратуре связи и измерительной технике. В зависимости от условий применения смесители должны удовлетворять определенным требованиям: низкие потери преобразования и шумы, большая полоса пропускания, не слишком большая мощность гетеродина, максимальное подавление нежелательных продуктов преобразования, большой динамический диапазон, максимальная развязка трактов гетеродина и сигнала и т.д. Разработанные компьютерные программы, такие как Microwave Office (MWO), позволяют методами гармонического баланса и рядов Вольтера достаточно быстро и точно рассчитывать различные нелинейные сверхвысокочастотные устройства, в том числе и смесители.

В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн широко используются субгармонические смесители (СГСМ) на диодах с барьером Шоттки (ДБШ). Однако на сегодняшний день характеристики этих диодов приближаются к верхнему частотному порогу из-за влияния паразитных параметров.

Некоторое время назад в качестве активного элемента СГСМ было предложено использовать резонансно-туннельный диод (РТД), имеющий антисимметричную вольтамперную характеристику (ВАХ) и заметную нелинейность при $V = 0$ (Алкеев, 2004).

РТД на основе многослойных наноразмерных гетероструктур благодаря целому ряду достоинств, таких как рабочий диапазон частот вплоть до ТГц, возможность проводить большие токи, является перспективным элементом микро - и наноэлектроники. Изменяя параметры слоёв

гетероструктуры, можно управлять формой вольтамперной характеристики и таким образом оптимизировать характеристики смесителей радиосигналов.

Изучение влияния вольтамперной характеристики нелинейного элемента на параметры СГСМ также связано с перспективами развития данного направления, т.к. использование СГСМ в радиоаппаратуре миллиметрового диапазона позволяет снизить себестоимость узлов. Кроме того, в субгармонических смесителях эффективно решается проблема просачивания мощности гетеродина в сигнальный тракт (Федоркова Н.В., 2011).

В предлагаемой статье приведены результаты исследования влияния ВАХ на характеристики СГСМ с целью определения вида ВАХ, оптимального для заданных рабочих параметров устройства. По виду ВАХ можно сконструировать структуру РТД.

В программе MWO, можно рассчитывать следующие параметры смесителей:

- коэффициент передачи LSS_{nm} (S параметры для большого сигнала), т.е. величина, обратная потерям преобразования. S-параметры могут быть рассчитаны на любой из гармоник, заданных в программе;
- коэффициент отражения входа S_{11} ;
- большесигнальный коэффициент отражения G_{comp} . Этот коэффициент отражения - нелинейный параметр в состоянии большесигнального возбуждения. Т. е. уровень сигнала, при котором достигаются существенные нелинейные искажения на активных элементах схемы. Коэффициент отражения может быть определен на любой из комбинационных частот;
- мощность гармоник Ph_{arm} ;
- точка пересечения третьего порядка IP_3 (Intercept Point 3d Order).

Изучая характеристики СГСМ, многие исследователи для простоты анализа исключают такие параметры диодов, как сопротивление потерь и параллельную емкость. С целью оценки их вклада в характеристики устройства было смоделировано несколько вариантов схемы СГСМ. На начальном этапе была выбрана упрощенная модель нелинейного преобразующего элемента (НЭ) в виде нелинейного резистора NLRES из библиотеки MWO без параллельной емкости и сопротивления потерь, описываемого полиномом n -ой степени.

Для работы в составе СГСМ с точки зрения качества преобразования оптимальной является модель, описываемая полиномом не выше 3-й степени. Из-за погрешностей технологического процесса изготовления диодной структуры возможно искажение характеристик диода, что ведет к увеличению степени нелинейности ВАХ диода. По этой причине первоначально для анализа была выбрана модель, описываемая полиномом 5-й степени вида:

$$I(V) = SC(A_0 + A_1 \times V + A_2 \times V^2 + A_3 \times V^3 + A_4 \times V^4 + A_5 \times V^5) \quad (1)$$

Масштабный коэффициент SC определяет точку начала ВАХ диода. Коэффициенты полинома оказывают влияние на статическую ВАХ диода. Для антисимметричной ВАХ четные коэффициенты A_2 и A_4 заданы равными нулю.

A_0 задает величину постоянного тока при нулевом напряжении смещения на диоде. Он также приравнивается к нулю.

Коэффициент A_1 определяет характеристики диода для приложенного к нему напряжения на частотах сигнала и гетеродина. Таким параметром является коэффициент отражения диода в составе диодной секции (ДС), т. е. согласование ДС по входу. Следовательно, SC и A_1 можно подобрать путем оптимизации характеристики зависимости коэффициента отражения ДС от входной мощности (суммарных амплитуд сигнала и гетеродина). Так как мощность гетеродина намного больше мощности сигнала, определяющим следует считать ее значение.

Коэффициент A_3 определяет такой важный параметр субгармонического смесителя, как потери преобразования. Коэффициент A_5 определяет амплитуды нежелательных комбинационных составляющих выходного спектра смесителя пятого порядка, т.е. уровень 1дБ компрессии.

Исследования, проведенные на первом этапе, позволили синтезировать модель ВАХ НЭ, которая стала исходной при проектировании СГСМ на базе реальной физической модели резонансно-туннельного диода, исходя из того, что любая диодная структура имеет внутреннюю емкость. Физическая модель учитывает параллельную емкость диодной структуры, величина которой в GaAs диодах составляет десятые доли пкФ.

Была спроектирована широкополосная схема СГСМ на базе физической модели РТД. Синтезированная схема СГСМ при мощности гетеродина 13 дБм на входе смесителя представлена на рисунке 1.

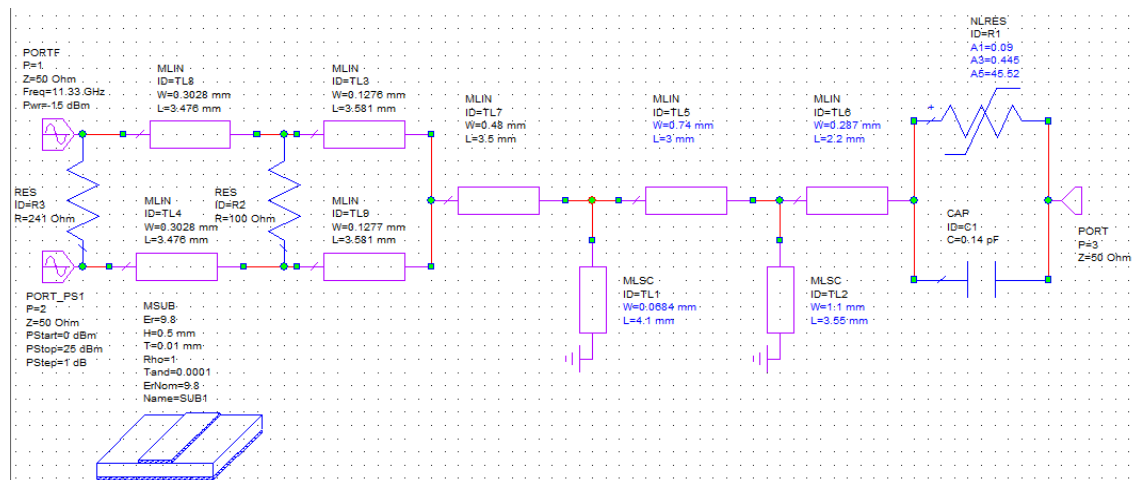


Рис. 1 Схема СГСМ

Схема СГСМ собиралась с учетом изменения коэффициентов полинома, значения которых были получены на начальном этапе исследования. Выбор ВАХ проводился для двух вариантов мощностей гетеродина: 8 дБм и 13 дБм на входе смесителя.

Для оценки данных, полученных в результате синтеза, сравнивались рабочие параметры синтезированного устройства с параметрами СГСМ на базе ДБШ при мощности гетеродина 13 дБм на входе.

На рисунке 2 представлен график зависимости потерь преобразования от мощности гетеродина на входе смесителя. График зависимости потерь преобразования от мощности сигнала показан на рисунке 3.

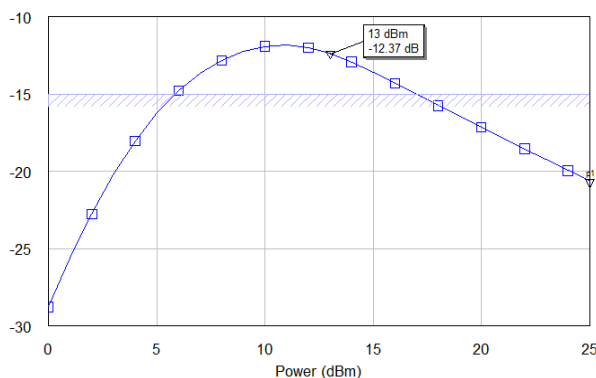


Рис. 2 Зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина.

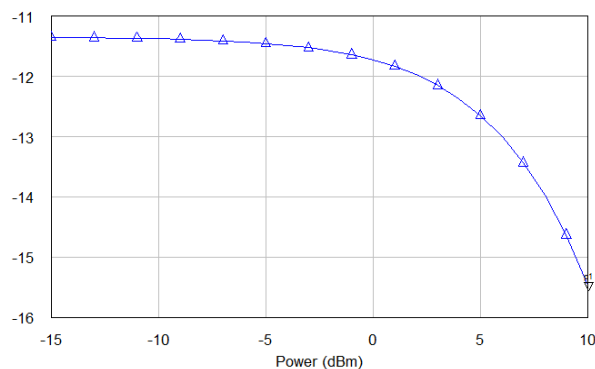


Рис. 3 Зависимость потерь преобразования от мощности сигнала.

По графику зависимости потерь преобразования от мощности сигнала можно рассчитать уровень мощности сигнала, при котором потери преобразования увеличиваются на 1 дБ - 1 дБ компрессию (P-1дБ). Для данного смесителя он равен 3.5 дБм. С учетом потерь в сумматоре сигналов мощность 1 дБ компрессии по входу диода равна 0.5 дБм.

В таблице 1 приведены результаты расчета значений основных параметров СГСМ на базе резонансно-туннельного диода при мощности сигнала -15 дБм, мощностях гетеродина 13 дБм на входе смесителя и СГСМ на базе диодов с барьером Шоттки при аналогичных мощностях сигнала и гетеродина.

Таблица 1 – Численные значения параметров субгармонических смесителей.

Параметры СГСМ	Мощность гетеродина 13 дБм на входе смесителя	
	СГСМ на РТД	СГСМ на ДБШ
Потери преобразования, дБ	9.37	11

Мощность 1 дБ компрессии по входу смесителя, дБм	0.9	-5.88
Уровень IP3 по входу, дБм	24.7	18.3

Сравнительный анализ результатов и результатов расчета СГСМ на РТД и ДБШ показал, что смеситель, выполненный на РТД, при мощности гетеродина 13 дБм обеспечивает уровень IP3 на 6.4 дБ превышающий уровень IP3 при реализации СГСМ на ДБШ и увеличение динамического диапазона на 6.78 дБ.

Результаты исследования влияния вида ВАХ нелинейного элемента СГСМ на базе резонансно-туннельного диода на его параметры показали, что для реализации смесителя на НЭ (при мощности гетеродина 13 дБм на входе смесителя), ВАХ которого описывается полиномом 5 степени, необходимо, чтобы коэффициенты этого полинома лежали в следующих пределах:

SC составляет порядка 10^{-4} (0.00009 для синтезированной схемы СГСМ);

A1 – сотые доли (0.09 для синтезированной схемы);

A3 – десятые доли (0.0445 для синтезированной схемы);

A5 – десятки (37.12 для синтезированной схемы).

При этом коэффициенты полинома оказывают различное влияние на параметры смесителя. Так, в процессе исследования было установлено, что коэффициент A1 ввиду его малого значения не влияет на параметры смесителя; варьирование коэффициента A3 приводит к незначительному изменению параметров устройства (при фиксированном значении A5 потери преобразования от мощности гетеродина меняются не более чем на десятые доли дБ, динамический диапазон по уровню -1 дБ компрессии и уровень IP3 – не более чем на сотые доли дБм).

На параметры смесителя существенным образом влияет только значение коэффициента A5. при этом на варьирование A5 реагирует только уровень IP3 по входу. Такие результаты объясняются соотношением значений всех коэффициентов полинома, а именно: $A2/A1=10$, $A3/A2=100$, $A3/A1=1000$. При значительном (на порядок) изменении этих соотношений на параметры смесителя будут оказывать те коэффициенты, относительное значение которых наибольшее. Однако выбор именно таких соотношений в нашем случае обусловлен ограниченностью ВАХ НЭ.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что для подобранных коэффициентов A1 и A3 существует одно конкретное значение коэффициента A5, соответствующее максимальному значению уровня IP3. Методика поиска этого значения A5

состоит в первичном проектировании смесителя и выборе параметров A_1 , A_3 , A_5 в пределах, указанных выше (при мощности гетеродина 13 дБм на входе смесителя), а затем в последовательном приближении к оптимальному значению A_5 , при котором уровень IP3 равен максимальному.

Однако такое приближение по параметру A_5 неизбежно приводит к изменению тока ВАХ НЭ при $V = 1В$, т.е. технология производства резонансно-туннельных диодов должна обеспечивать возможность протекания через диод тока в пределах приблизительно от 3 до 5 мА при напряжении 1В. При выполнении этого условия коэффициент A_5 может быть использован для управления уровнем IP3.

Таким образом, благодаря возможности управления видом ВАХ нелинейного элемента можно получить следующее улучшение параметров СГСМ по сравнению со смесителем на ДБШ:

- расширить динамический диапазон по уровню 1 дБ компрессии на 6.78 дБ;
- расширить динамический диапазон по уровню IP3 на 6.4 дБ.

Список литературы

1. **Алкеев Н.В.** Анализ шумовых и динамических свойств субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде [Журнал] // Радиотехника и электроника. - 2004 г.. - 10 : Т. 49. - стр. 1258-1263.
2. **Белов Л.А.** Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты. [Журнал] // Электроника: наука, технологии, бизнес. - 2004 г.. - Т. 2. - стр. 44.
3. **Дмитриев Е. Е.** Основы моделирования в Microwave Office 2009 [Книга]. - 2009. - стр. 119.
4. **Федоркова Н.В. Иванов Ю.А. и др.** Исследования и разработка полупроводниковых наногетероструктур для смесителей радиосигналов систем микро- и наноэлектроники [Отчет]. - 2011.