

Электродинамика, антенны и техника СВЧ

DOI 10.24412/2221-2574-2025-4-55-65

УДК 621.314.263

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИКОВОГО СМЕСИТЕЛЯ V-ДИАПАЗОНА С СОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКОЙ

Билинский Кирилл Владимирович

кандидат технических наук, инженер-конструктор 4 отдела, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»¹.

E-mail: bilinskiy_kv@niipp.ru

Емельянов Евгений Витальевич

кандидат физико-математических наук, начальник 43 лаборатории, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»¹; доцент кафедры радиоэлектроники, ФГБОУ ВО «Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет»².

Леликова Марина Петровна

инженер-технолог 2 категории 4 отдела, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»¹.

¹Адрес: 634034, Российская Федерация, г. Томск, Красноармейская ул., д. 99а.

²Адрес: 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, д. 36.

Аннотация: Рассмотрены волноводно-микрополосковая конструкция и принцип действия гармоникового смесителя V-диапазона (50...75 ГГц), нелинейным элементом (НЭ) которого является диодная сборка диодов с барьером Шоттки (ДБШ). Данная диодная сборка состоит из двух параллельных встречно включённых ДБШ. Представлен теоретический анализ работы смесителя. Описана оригинальная конструкция гармоникового смесителя, обеспечивающая согласование в широком диапазоне частот по волноводному радиосигнальному входу. Рассмотрены метод расчёта (основанный на электродинамическом моделировании составных узлов волноводно-микрополосковой конструкции и нелинейном анализе общей структуры) и методика разработки смесителя. Приведены модели НЭ: линейная (на основе эквивалентной электрической цепи) и нелинейная (на основе встроенной программной модели идеального контакта металл-полупроводник и SPICE-параметров реального ДБШ). Изложена методика измерений основных электрических параметров смесителя (потери преобразования, коэффициента отражения по сигнальному входу и выходу промежуточной частоты, динамический диапазон). Представлены экспериментальные результаты исследования электрических параметров. Проведён сравнительный анализ эмпирических данных и результатов расчёта. Представлено сравнение с аналогами.

Ключевые слова: гармониковый смеситель, диодная сборка, диод с барьером Шоттки, потери преобразования, нелинейный элемент, расчётная модель.

Введение

Современная радиотехника и радиоэлектроника широко использует приборы и устройства, работающие в том числе в КВЧ-диапазоне длин волн [1]. Так как КВЧ-диапазон оптимален для передачи и приёма радиосигналов (информации) при решении значительного числа прикладных (в том числе и научно-исследовательских) задач, то существует по-

требность в устройствах, способных преобразовывать радиосигнал – переносить высокочастотный сигнал с сохранением его спектра (закон модуляции и пр.) в область более низких промежуточных частот (ПЧ), для дальнейшей обработки. Одним из таких устройств, преобразующих частоту, является гармониковый смеситель [2]. Актуальной областью применения гармоникового смесителя является изме-

рительная техника КВЧ-диапазона, а именно модули расширения частотного диапазона (МРЧД) измерительного оборудования (векторных анализаторов цепей, анализаторов спектра и т.п.) [3]. Гармониковый смеситель является одним из ключевых узлов в модулях расширения частотного диапазона, но в отличии от балансного смесителя (который также может быть применён в МРЧД), позволяет получить следующие преимущества: низкие частоты сигнала гетеродина (как правило не более 20 ГГц), отсутствие дополнительных развязывающих КВЧ-вентиляй, простота сборки и настройки, относительная дешевизна. Основные недостатки, присущие гармониковому смесителю, такие, как большие потери преобразования и худшие шумовые характеристики (в сравнении с балансным и субгармоническим смесителями), при применении в МРЧД не оказывают существенного влияния на общие параметры устройства. Ведущие иностранные компании в области радиотехники и радиоэлектроники Virginia Diodes, Inc [4], Farran Technology [5], Tektronix [6], Talent Microwave [7], AT-Microwave [8] производят широкий ассортимент гармониковых смесителей, работающих в диапазоне 26,5...700 ГГц. Закупка и использование зарубежных смесителей сопряжена с большими временными и денежными затратами, отечественные аналоги на КВЧ-диапазон относительно немногочисленны, либо обладают худшими характеристиками [9]. Таким образом, актуально создание отечественных гармониковых смесителей по своим характеристикам не уступающим иностранным аналогам.

Цель работы заключается в разработке гармоникового смесителя КВЧ-диапазона (в данном случае 50...75 ГГц), по своим характеристикам не уступающим иностранным аналогам, а также в проведении исследований электрических параметров разработанного смесителя. В качестве нелинейного элемента (НЭ) гармоникового смесителя применяется диодная сборка, состоящая из двух параллельных

встречно включённых диодов с барьером Шоттки (ДБШ) [10].

Для достижения данной цели, необходимо решить следующие задачи:

- выполнение электродинамического моделирования ключевых узлов (волноводно-микрополосковых конструкций) гармоникового смесителя (НЭ заменяется линейной моделью с эквивалентными параметрами, соответствующими рабочему режиму диодов);
- проведение нелинейного анализа на основе нелинейной SPICE-модели ДБШ и полученных ранее S-параметров ключевых узлов гармоникового смесителя;
- изготовление рабочих образцов гармоникового смесителя V-диапазона;
- проведение исследования электрических параметров (потери преобразования, коэффициент отражения по радиосигнальному (РЧ) входу и выходу ПЧ, развязки между трактами сигнала гетеродина и ПЧ, РЧ) гармоникового смесителя.

Теоретический анализ потерь преобразования гармоникового смесителя

«Смеситель — это электрическая цепь, создающая спектр комбинационных частот при подаче на неё двух или более сигналов разной частоты» (согласно ГОСТ 24375-80). В данной статье рассматривается гармонический смеситель, осуществляющий сложение (вычитание) первой гармоники радиосигнала (РЧ) и n -й чётной гармоники (в данном случае $n = 6$) опорного сигнала гетеродина (ОС). Результатом такой операции является низкочастотный сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Частота ПЧ определяется соотношением

$$f_{\text{ПЧ}} = \eta f_{\text{ОС}} - f_{\text{РЧ}} \quad \text{или} \quad f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{РЧ}} - \eta f_{\text{ОС}} \quad (1)$$

в зависимости от соотношения по частотам между 1-й гармоникой РЧ и n -й гармоникой гетеродина ($\eta f_{\text{ОС}} < f_{\text{РЧ}}$ или $\eta f_{\text{ОС}} > f_{\text{РЧ}}$).

Теоретический анализ потерь преобразования гармоникового смесителя подробно рассмотрен в работе [11, 12]. Ниже приведено аналитическое выражение потерь преобразо-

вания для широкополосного режима работы смесителя (преобразованная РЧ-мощность делится пополам между выходными сигналами ПЧ и зеркальной частоты (ЗЧ)) [12].

$$L = L_0 \left(1 + \frac{R_{s\omega}}{R_d \omega} + \omega^2 R_d \omega R_{s\omega} C_d^{-2}\right) \left(1 + \frac{R_s}{R_{\text{вых}}}\right), \quad (1)$$

где

$$L_0 = 2 \left[1 + \frac{\eta k T}{q} \left(V_0 + \frac{q}{\eta k T} \sum_{z=1}^{\infty} U_{OC} \cos(z \omega_{OC} t) \right)^{-1} \right],$$

$q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; $k = 1,37 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T = 300$ К — температура; $\eta = 1,25$ — коэффициент идеальности ДБШ; z — номер гармоники гетеродина; V_0 — постоянная составляющая гетеродина; ω — частота РЧ; $R_{вых}$ — выходное сопротивление смесителя; R_s и $R_{s\omega}$ — сопротивления объёма полупроводника неметаллического элемента на низких (ПЧ) и высоких (РЧ) частотах; R_d , C_d и $R_{d\omega}$, $C_{d\omega}$ — дифференциальные сопротивление и ёмкость барьера контакта Шоттки на частотах сигнала гетеродина и радиосигнала.

Устройство и принцип действия гармоникового смесителя

Принципиальная схема реализованного гармоникового смесителя с согласованной нагрузкой указана на рис. 1.

Гармониковый смеситель V-диапазона имеет волноводный РЧ-вход и общий коаксиальный вывод, на который подается опорный сигнал гетеродина и снимается выходной сигнал ПЧ. На рис. 2 приведена конструкция волноводно-микрополосковой части гармоникового смесителя V-диапазона.

Разработанный гармониковый смеситель V-диапазона, принципиально отличается от гармоникового смесителя, описанного в работе [12], новым принципом согласования РЧ-входа 1. Данный принцип [13] (в отличие от широко применяемого размещения согласованной нагрузки непосредственно во входном РЧ-волноводе) заключается в размещении согласованной волноводной нагрузки 8 в дополн-

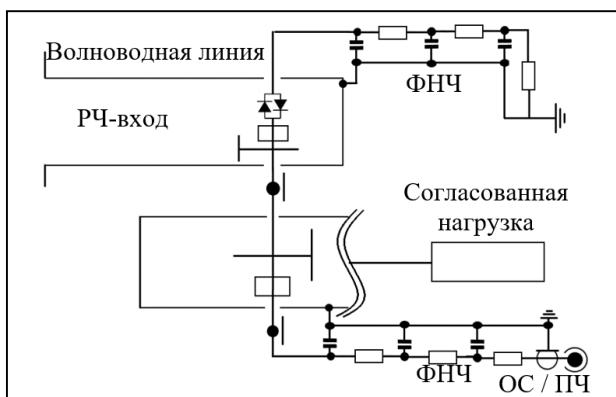


Рис. 1. Принципиальная схема гармоникового смесителя

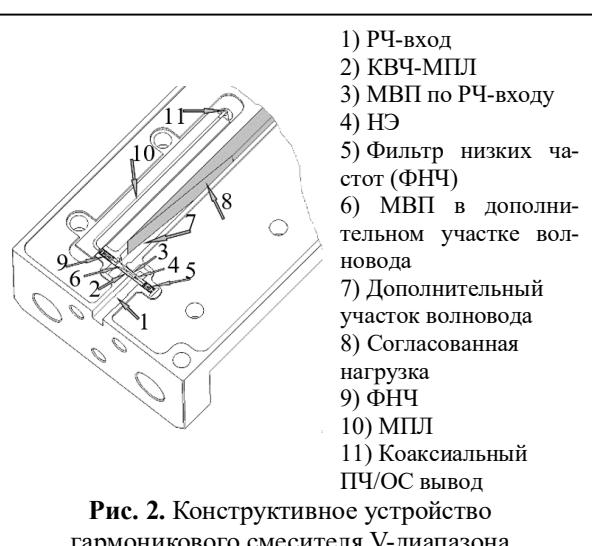


Рис. 2. Конструктивное устройство гармоникового смесителя V-диапазона

нительном участке волноводной линии 7, соединённым с входным волноводом 1 микрополосковой линией (КВЧ МПЛ) 2 посредством микрополосково-волноводных переходов (МВП) 3 и 6. Нелинейный элемент — диодная сборка двух антипараллельных ДБШ 4 — размещён во входном волноводе на расстоянии, кратном нечётному числу длин четвертей волны РЧ-сигнала (средней частоты по диапазону используемого волновода). Фильтры низких частот 5 и 9 предназначены для развязки цепи смещения НЭ гетеродином от РЧ-сигнала и для изоляции выхода ПЧ (одновременно и входа сигнала гетеродина) от входа РЧ-сигнала. Сигнал ПЧ с КВЧ микрополосковой линии 2 через микрополосковую линию МПЛ 10 передаётся на коаксиальный вывод 11. На коаксиальный вывод поступает сигнал гетеро-

дина и выводится сигнал ПЧ с использованием внешнего диплексера, предназначенног для разделения данных сигналов. Применяемый диплексер ДПЛ612 [12] разделяет полосы ПЧ (0...2 ГГц) и ОС (5,5...14 ГГц). КВЧ микрополосковая линия 2, МВП 3 и 6, ФНЧ 5 и 9 реализованы на тонкой диэлектрической подложке (толщина — 75 мкм), с осаждённой верхней и нижней золотой металлизацией (4 мкм). Согласованная нагрузка 8 клинообразной формы изготовлена из специального радиопоглощающего материала ЗИПСИЛ РПМ-01 ТУ 2541-004-24624998-2014 [14].

Функционирует данный смеситель следующим способом. Входной РЧ-сигнал, распространяясь по входному волноводу 1 (сечение волновода 3,6×1,8 мм), попадает на МВП 3. МВП 3 осуществляет преобразование распространяющейся по прямоугольному волноводу волны H_{10} -типа в квази-TEM-тип, распространяющейся по КВЧ-МПЛ 2 к МВП 6. Также следует отметить преобразование типа электромагнитной волны n -ой гармоники сигнала гетеродина из квази-TEM в H_{10} -тип: МВП 6 осуществляет обратное преобразование волны из квази-TEM-типа в H_{10} -тип, распространяющийся в дополнительном участке волновода 7; далее РЧ-сигнал в виде электромагнитной волны H_{10} -типа попадает на согласованную волноводную нагрузку 8; ФНЧ 9 препятствует прохождению РЧ-сигнала в цепь ПЧ и ОС, таким образом смеситель согласуется по РЧ-входу. Нелинейный элемент 4 смонтирован в РЧ-волноводе 1 между МВП 3 и участком КВЧ-МПЛ 2, обеспечивающим «заземление» НЭ по основной и рабочей (n) гармоникам сигнала гетеродина. Для изоляции цепи смешения НЭ 4 сигналом гетеродина от РЧ сигнала применён ФНЧ 5. НЭ 4 расположен таким образом, чтобы оказаться в пучности (максимуме) электромагнитного поля РЧ-сигнала. Положение максимумов электромагнитного поля РЧ-сигнала (во входном РЧ-тракте) определяется расстоянием до «закоротки» РЧ-волновода 1, соответствующем кратному нечётному числу четвертей длин волн входно-

го РЧ-сигнала $((2k-1)\lambda_{\text{РЧ}}/4)$ с учётом неоднородностей поля, вызванных МВП 3 и нелинейным элементом 4. Рабочий режим НЭ 4 задаётся частотой $((f_{\text{РЧ}} + f_{\text{ПЧ}})/n)$ и мощностью первой гармоники ОС (10...17 дБм). На нелинейном элементе 4 осуществляется перенос спектра РЧ-сигнала на промежуточную частоту. Сигнал ПЧ с НЭ 4 через КВЧ-МВП 2 попадает на микрополосковую линию 10 и далее на коаксиальный вывод 11.

На рис. 3 указана волноводно-микрополосковая конструкция гармоникового смесителя V-диапазона.

Нелинейный элемент 4 представляет собой диодную сборку двух параллельных встречно включённых диодов с барьером Шоттки

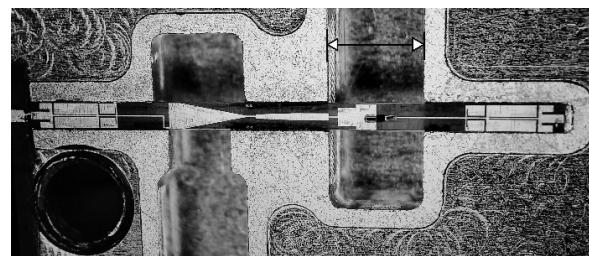


Рис. 3. Волноводно-микрополосковая конструкция гармоникового смесителя V-диапазона

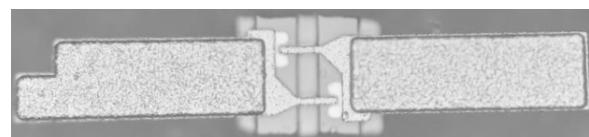


Рис. 4. Диодная сборка DBSH

(рис. 4), подробно описанную в работе [12].

Разработка гармоникового смесителя

При проведении математического моделирования использовался ряд допущений [12]: на НЭ рассматриваются сигналы только гармонической формы; смеситель работает в границах динамического диапазона ($P_{\text{шум}} \ll P_{\text{РЧ}} < P_{\text{ОС}}$) при линейной зависимости мощности выходного ПЧ-сигнала уровня входного РЧ-сигнала; НЭ короткозамкнут на всех гармониках гетеродина кроме первой и чётной рабочей (n); для дифференциальных параметров R_d и C_d не учи-

тывается влияние переходных процессов ДБШ; C_d принимается равной константе.

Математический расчёт включает в себя электродинамическое моделирование и нелинейный анализ. Электродинамическое моделирование включало в себя: линейный волноводно-микрополосковых переходов 3 и 6, ФНЧ 5 и 9, КВЧ микрополосковой линии 2; оптимизация расположения НЭ 4 в входном РЧ-волноводе. Согласование НЭ 4 осуществлялось в диапазонах частот радиосигнала (50...75 ГГц) и гетеродина (8...14 ГГц). Нелинейный элемент заменяется объёмной моделью в масштабе 1 к 1 с реальной диодной сборкой ДБШ, при этом каждый барьерный контакт Шоттки представлен эквивалентной схемой (рис. 5).

Эквивалентная схема содержит следующие сосредоточенные параметры: C_d , R_d , R_s . Значения сосредоточенных параметров расчётной модели НЭ в рабочем режиме работы смесителя составляют: $R_d = 220$ Ом, $C_d = 45$ фФ, $R_s = 12$ Ом [8].

Результаты, полученные посредством электродинамического моделирования S-параметров фильтра низких частот приведены на рис. 6. Смоделированный ФНЧ характеризуется следующим образом: прямые потери ($|S_{21}|$) в диапазоне РЧ (50...75 ГГц) составляют не менее 35 дБ, коэффициент отражения ($|S_{11}|$) в полосе ПЧ менее 30 дБ, коэффициент отражения ($|S_{11}|$) в полосе ОС не более 15 дБ.

Далее проводилось электродинамическое моделирование микрополоскового-волноводного перехода 6 в совокупности с ФНЧ 9. Результаты моделирования следующие: прямые потери ($|S_{21}|$) на прохождение РЧ-сигнала в дополнительный участок волновода 7 не превышают 1 дБ, также прямые потери ($|S_{13}|$) в полосе ПЧ и ОС не превышают 0,5 дБ (рис. 7).

Затем осуществлялось электродинамическое моделирование волноводно-микрополосковой конструкции смесителя полностью (рис. 8), причём НЭ 4 заменялся линейной расчётной моделью с целью согласования РЧ-

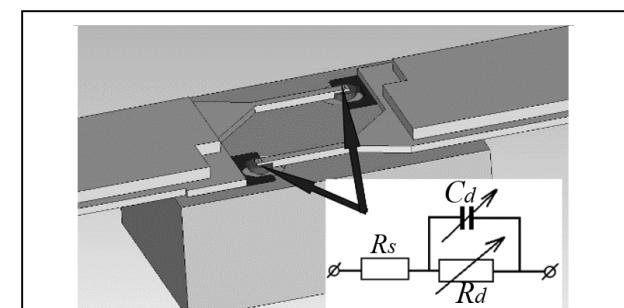


Рис. 5. Расчётная модель антипараллельной пары ДБШ

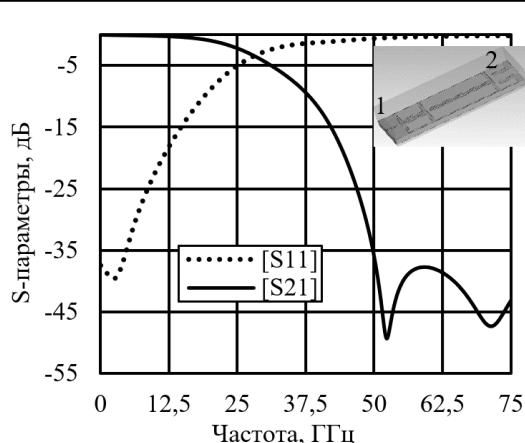


Рис. 6. S-параметры ФНЧ (модуль значений)

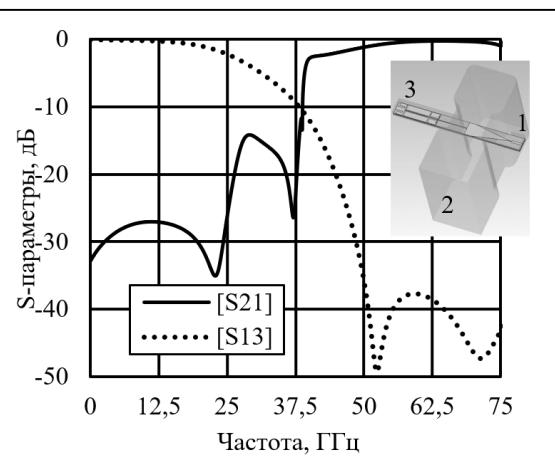


Рис. 7. S-параметры ФНЧ (9) и МВП (6)

входа 1 в рабочей полосе частот (50...75 ГГц) и размещения НЭ 4 в пучности электромагнитного поля РЧ-сигнала. А также с целью согласования НЭ с первой гармоникой гетеродина, задающей рабочие параметры НЭ, в полосе частот 8...14 ГГц.

Далее, используя S-параметры составных узлов волноводно-микрополосковой конструк-

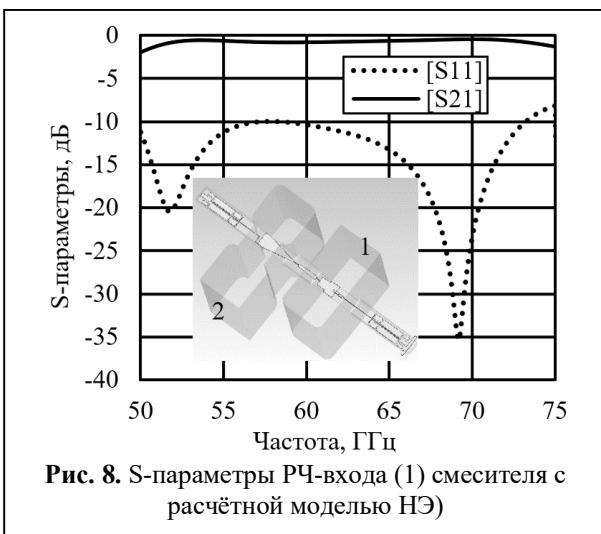


Рис. 8. S-параметры РЧ-входа (1) смесителя с расчётной моделью НЭ

ции смесителя и нелинейную SPICE-модель ДБШ [15] проводился нелинейный анализ смесителя методом гармонического баланса [16]. Диодная сборка двух антипараллельных ДБШ заменилась двумя идентичными нелинейными SPICE-моделями ДБШ, каждая из которых состоит из встроенной в САПР [17] модели идеального перехода металл-полупроводник и SPICE-параметров реального ДБШ. Нелинейные характеристики барьера Шоттки представлены вольт-амперной (2) и вольт-фарадной (3) зависимостями [18]:

$$I(V) = I_s \left[\exp\left(q\left(\frac{V - IR_s}{\eta kT}\right) - 1\right) \right], \quad (2)$$

где $I_s = 13 \times 10^{-15}$ — ток насыщения контакта металл-полупроводник; V — напряжение, приложенное к диоду; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; $k = 1,37 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T = 300$ К — температура; $\eta = 1,25$ — коэффициент идеальности ДБШ;

$$C_d(V) = \frac{C_{d0}}{\left(1 - \frac{V_j}{V}\right)\gamma}, \quad (3)$$

где C_{d0} — барьерная ёмкость при нулевом смещении; ϕ_{bi} — химический потенциал; V_j — контактная разность потенциалов ($V_j > 0$); γ — профиль концентрации легирующей примеси. Параметры SPICE модели ДБШ [11], характеризующие электрофизические параметры реального ДБШ, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры SPICE-модели ДБШ

Параметр ДБШ		Единицы измерения	Значение
I_s	Ток насыщения	фА	15
R_s	Последовательное сопротивление	Ом	12
N	Коэффициент идеальности		1,25
C_{d0}	Барьерная ёмкость при нулевом смещении	фФ	45
V_j	Контактная разность потенциалов	В	0,65
M	Коэффициент плавности		0,5
B_v	Напряжение пробоя (обратное)	В	12
I_bV	Начальный ток пробоя	пА	15

Методика измерений

Исследование основных электрических параметров гармоникового смесителя (потери преобразования, коэффициент отражения по РЧ-входу и ПЧ-выходу, динамический диапазон) проводилось на векторном анализаторе цепей PNA-X N5244B [19] с использованием МРЧД N5293AX03 с рабочим диапазоном частот 900Hz–110GHz [20] по стандартной методике [21], схема которой приведена на рис. 9. Калибровка по мощности трактов РЧ, ПЧ, ОС осуществлялась с помощью измерителя мощности U8489A [22]. Для гетеродинного тракта использовался усилитель мощности с рабочим диапазоном 0,001…23 ГГц при коэффициенте усиления по мощности не менее 30 дБ. Диапазон РЧ составлял 50…75 ГГц, ПЧ — 0,01…2 ГГц, ОС — 5…14 ГГц.

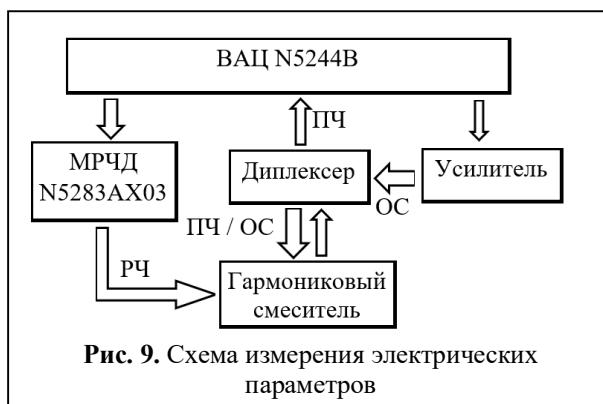


Рис. 9. Схема измерения электрических параметров

Экспериментальные результаты

В диапазоне РЧ (50...75 ГГц) получены экспериментальные значения потерь преобразования гармоникового смесителя V-диапазона. При проведении эксперимента использовалась 6-я гармоника гетеродина с мощностью $P_{\text{ос}} = 13$ дБм, мощность радиосигнала РЧ составляла $P_{\text{рч}} = -20$ дБм, измерения осуществлялись на промежуточной частоте $f_{\text{ПЧ}} = 100$ МГц. Сравнение экспериментальных значений потерь преобразования сопоставлены с расчётными данными (приведено на рис. 10).

Также рассмотрены практические значения коэффициента отражения ($[S_{11}]$) по РЧ-входу и результаты электродинамического моделирования (рис. 11).

Потери преобразования в полосе частот радиосигнала ($f_{\text{ПЧ}} = 100$ МГц) составляют $16,8 \pm 2$ дБ. Наблюдается корреляция экспериментальных данных с результатами электродинамического моделирования и нелинейного анализа. Практические значения коэффициента по РЧ-входу смесителя не более -5 дБ во всем диапазоне частот РЧ, а на участке 58...70 ГГц составляют менее -10 дБ, также просматривается качественное совпадение с результатами расчёта. Отличия связаны, в том числе, с упрощённой расчётной моделью НЭ, используемого при электродинамическом моделировании, не учитывающей нелинейные характеристики и паразитные параметры антипараллельной пары ДБШ.

Осуществлено исследование потерь преобразования при постоянной частоте сигнала гетеродина $f_{\text{ос}} = 10,417$ ГГц, в полосе частот ПЧ $f_{\text{ПЧ}} = 0,01 \dots 2$ ГГц (рис. 12).

Измеренные потери преобразования в диапазоне ПЧ составляют $17,3 \pm 0,6$ дБ. Также следует отметить, что коэффициент отражения по выходу ПЧ-тракта диплексера не более -15 дБ.

Проведено исследование зависимости выходной мощности сигнала ПЧ от мощности сигнала гетеродина $P_{\text{ПЧ}}(P_{\text{ос}})$ (рис. 13). Эксперимент осуществлялся на частоте гетеродина $f_{\text{ос}} = 10,417$ ГГц, при промежуточной частоте

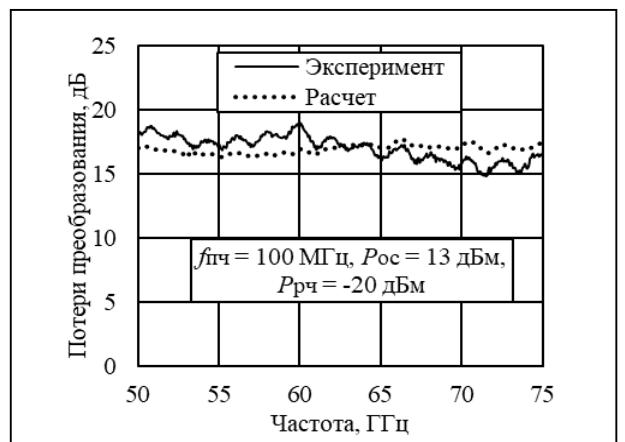


Рис. 10. Сравнение расчётов и экспериментальных значений потерь преобразования

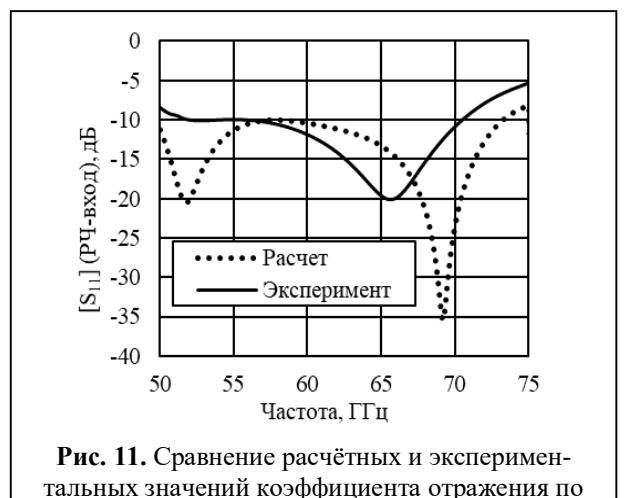


Рис. 11. Сравнение расчётов и экспериментальных значений коэффициента отражения по РЧ-входу

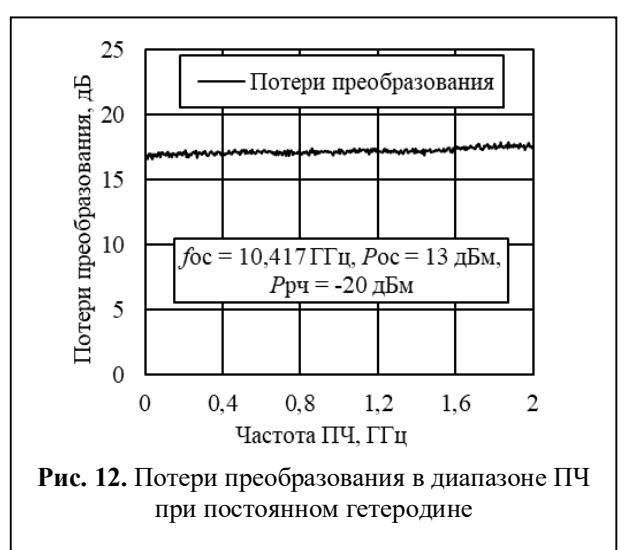


Рис. 12. Потери преобразования в диапазоне ПЧ при постоянном гетеродине

ПЧ $f_{\text{ПЧ}} = 100$ МГц и мощности радиосигнала $P_{\text{рч}} = -20$ дБм.

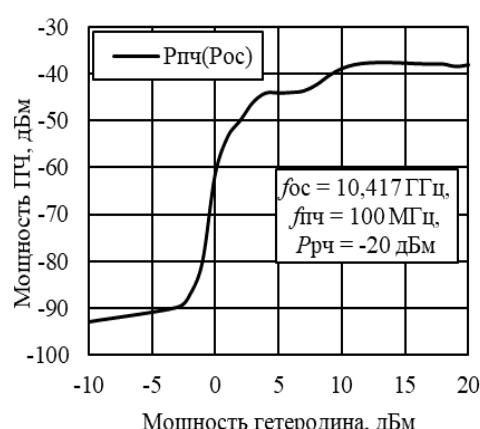


Рис. 13. Зависимость выходной мощности ПЧ от мощности сигнала гетеродина $P_{\text{пч}}(P_{\text{ос}})$

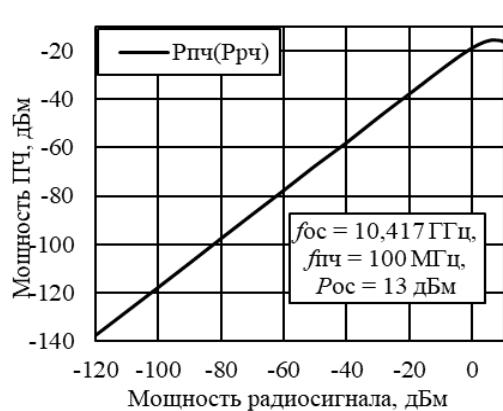


Рис. 14. Зависимость выходной мощности сигнала ПЧ от мощности радиосигнала $P_{\text{пч}}(P_{\text{ос}})$

Из экспериментальных данных следует, что диапазон мощностей гетеродина для оптимальной работы смесителя составляет 11...17 дБм.

Исследована зависимость мощности выходного сигнала ПЧ от мощности входного радиосигнала $P_{\text{пч}}(P_{\text{ос}})$ (рис. 14). Частота ПЧ составляла $f_{\text{пч}} = 100 \text{ МГц}$ ($P_{\text{ос}} = 13 \text{ дБм}$, $f_{\text{ос}} = 10,417 \text{ ГГц}$).

Динамический диапазон смесителя по РЧ-входу составляет не менее 115 дБ ($P_{\text{пч}} = -120 \dots -5 \text{ дБм}$), уровень однодецибелевой компрессии равняется 0 дБм.

Заключение

В результате разработки получен гармониковый смеситель V-диапазона, являющийся

аналогом иностранных изделий (таблица 2).

Потери преобразования разработанного гармоникового смесителя в заданном рабочем режиме (шестая гармоника гетеродина, $P_{\text{ос}} = 13 \text{ дБм}$, $P_{\text{пч}} = -20 \text{ дБм}$), в полосе РЧ 50...75 ГГц на ПЧ $f_{\text{пч}} = 100 \text{ МГц}$ составляют $16,8 \pm 2 \text{ дБ}$, а в диапазоне ПЧ 0,01...2 ГГц менее 20 дБ. Оптимальная работа смесителя обеспечивается мощностью гетеродина 11...17 дБм. Коэффициент отражения от РЧ-входа составляет менее -5 дБ и менее -15 дБ по ПЧ-выходу смесителя. Развязка между микрополосковыми трактами гетеродина и ПЧ обеспечивается внешним диплексером (составляет более 45 дБ) [12]. А развязка между трактами ПЧ (коаксиальное исполнение) РЧ (волноводная линия) составляет не менее 40 дБ. Рабочий диапазон по мощности входного РЧ-сигнала от -120 дБ до $+3 \text{ дБ}$, динамический диапазон составляет 115 дБ ($P_{\text{пч}} = -120 \dots -5 \text{ дБм}$), уровень однодецибелевой компрессии $P_{1\text{dB}} = 0 \text{ дБм}$.

Наблюдается корреляция результатов расчёта и экспериментальных данных для частотной зависимости потерь преобразования и коэффициента отражения по РЧ-входу. Расхождения между расчётными значениями и экспериментальными данными объясняются тем, что в расчёте в качестве НЭ применяется упрощённая модель, не в полной мере отображающая нелинейный характер и паразитные параметры ДБШ.

Таким образом, практическая реализации рабочего образца гармоникового смесителя V-диапазона с основными электрическими па-

Таблица 2. Сравнение с аналогами

Параметр	Ед. изм.	СМ-05-Г	WHMB-15-0001[5]	WR15EH M [4]
Диапазон РЧ	ГГц	50...75	50...75	50...75
Номер гармоники ОС		6	6	12
Мощность ОС	дБм	13...17	13...17	13...15
Диапазон ПЧ	ГГц	0...2	0...2	0...2
Потери преобразования (тип. знач.)	дБ	17...20	25	20...25

раметрами достаточно близкими к расчётным данным подтверждает правильность применения методов расчёта и разработки.

Литература

1. Бенсон К. Использование КВЧ-диапазона в системах 5G-связи // СВЧ-электроника. 2021. №2. С. 54–57.
2. Cunn K. Смесители и модуляторы в высокоскоростных системах связи // Электронные компоненты. 2011. №4. С. 90–95.
3. Дингес С.И., Кочемасов В.Н. Устройства расширения диапазона рабочих частот измерительного оборудования. Часть 2 // СВЧ-электроника. 2018. №3. С. 43–51.
4. Even Harmonic Mixers (EHM) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vadiodes.com/en/products-6/mixers-shm-ehm-and-fin> (дата обращения: 05.01.2025).
5. Harmonic Mixers (WHMB) [Электронный ресурс]. URL:<https://farran.com/farran-products/harmonic-mixers-whmb/> (дата обращения: 05.01.2025).
6. High Performance Waveguide Mixers: Instruction manual, Part No. 070-3731-01. Product Group 26. Tektronix. USA, 1983. 73 р.
7. Spectrum Analyzer Harmonic Mixers [Электронный ресурс]. URL: <https://www.talentmw.com/en/productTable.html?cid1=6&cid2=22&cid3=140> (дата обращения: 05.03.2025).
8. Waveguide IQ Mixer [Электронный ресурс]. URL:https://www.atmicrowave.com/index.php/product_s_32/155.html (дата обращения: 05.03.2025).
9. Карпов Ю.А. Смесители, преобразователи, умножители и делители частоты СВЧ-диапазона отечественного производства // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С. 22–27.
10. Бадын А.В., Москаленко В.Д., Пидотова Д.А. Электрофизические характеристики суб-ТГц диода с барьером Шоттки // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции. 2020. № 1-1. С. 129–132.
11. Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М.: Сов. радио, 1974. 248 с.
12. Билинский К.В., Емельянов Е.В., Сбродов А.В. Исследование влияния конструкции антипараллельной пары диодов с барьером Шоттки на потери преобразования гармонического смесителя 3-мм диапазона // Доклады ТУСУРа. 2024. Т. 27. №1. С. 13–22.
13. Пат. РФ на полезную модель №234225. Гармониковый смеситель / Билинский К.В., Емельянов Е.В., Бурмистрова В.А. и др. Заявл. 09.10.2024; опубл. 22.05.2025. Бюл. №15.
14. ЗИПСИЛ. Материалы электромагнитной совместимости. Каталог продукции 2024. Компания «РТ-Технологии» [Электронный ресурс]. URL: <rt-docs.ru/wp-content/uploads/2023/01/каталог-продукции-ЗИПСИЛ.pdf> (дата обращения: 07.01.2025).
15. Билинский К.В. Разработка преобразователей частоты КВЧ диапазона: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2024. URL: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/h8g5nfcv> (дата обращения: 06.01.2025).
16. Ланцов В.Н. Новый метод и алгоритм решения уравнений гармонического баланса // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. №4. С. 27–31.
17. Advanced Design System (ADS) [Электронный ресурс]. URL: https://dipaul.ru/catalog/element/advanced_design_system_ads/ (дата обращения: 07.01.2025).
18. Семенов Э.В., Малаховский О.Ю., Божков В.Г. Неквазистатическая модель диода с учетом токов экстракции и рекомбинации неравновесных носителей заряда // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. Т. 22, №4. С. 26–32.
19. Keysight Technologies N5293AX03 [Электронный ресурс]. URL: https://www.electorent.com/eu/products/rf-and-microwave-network-analyzers/test-sets/keysight-technologies/n5293ax03/01t1O00000_BIGQZQAS (дата обращения: 10.01.2025).
20. Keysight N1913A and N1914A. Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1843836.pdf> (дата обращения: 10.01.2025).
21. Пивак А., Репин А. Измерение параметров усилителей, смесителей и дифференциальных устройств с помощью векторного анализатора цепей // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. Сер. Контроль и измерения. 2018. №5. С. 120–127.
22. U8489A Термопарный измеритель мощности постоянного тока до 120 ГГц с шиной USB [Электронный ресурс]. URL: https://dipaul.ru/catalog/element/u8489a_termoparnyy_izmeritel_moshchnosti_postoyannogo_toka_do_120_ggts_s_shinoy_usb/ (дата обращения: 10.01.2025).

Поступила 28 июля 2025 г.

English

DESIGN AND STUDY OF ELECTRICAL PARAMETERS V-BAND HARMONIC MIXER

Kirill Vladimirovich Bilinsky — PhD in Engineering, Design Engineer, JSC «Scientific Research Institute of Semiconductor Devices»¹.

E-mail: bilinskiy_kv@niipp.ru

Evgeny Vitalievich Yemelyanov — PhD in Physics and Mathematics, the Head of Laboratory, JSC «Scientific Research Institute of Semiconductor Devices»¹; associate professor, The National Research Tomsk State University².

Marina Petrovna Lelikova — Process Engineer of the 2nd category, JSC «Scientific Research Institute of Semiconductor Devices»¹.

¹Address: 634034, Russian Federation, Tomsk, Krasnoarmeyskaya St., 99a.

²Address: 634050, Russian Federation, Tomsk, Lenin Ave., 36.

Abstract: This article discusses a V-band (50–75 GHz) harmonic mixer, focusing on the design of its waveguide-microstrip section and its operating principle. An analytical assessment of the conversion losses in the harmonic mixer is presented. The mixer features a waveguide input for the radio frequency (RF) signal and a common coaxial input for the intermediate frequency (IF) and local oscillator (LO) signals. The waveguide-microstrip structure is a hybrid integrated circuit placed in the E-plane of the waveguide, fabricated on a thin dielectric substrate with a nonlinear element (NE) mounted on it. The nonlinear element is a diode assembly comprising two series-connected Schottky barrier diodes (SBD). A novel method for matching the harmonic mixer to the RF input is described; it involves placing a matched load in an additional waveguide section connected to the RF path via a microstrip line. A calculation methodology is presented, involving the electrodynamic modeling of the waveguide-microstrip structure followed by nonlinear analysis. Two NE models are used: a linear model for electrodynamic simulation (based on the SBD equivalent circuit) and a nonlinear model for harmonic balance analysis (based on the built-in software model of an ideal metal-semiconductor junction and the SPICE parameters of a real SBD). The calculation procedure includes sequential electrodynamic modeling of the mixer components: the low-pass filter (LPF), the microstrip-to-waveguide junction (MWJ) in the additional waveguide section, the MWJ at the RF input, the matching microstrip line, and the overall assembly. This is followed by a nonlinear analysis using the obtained S-parameters and the nonlinear SBD model. A method for measuring key electrical parameters—such as conversion loss, RF input and IF output reflection coefficients, and dynamic range—using a vector network analyzer with a frequency extender module is described. Experimental results for these parameters are provided. A comparative analysis of the experimental data and simulation results is conducted, along with a comparison to foreign counterparts.

Keywords: harmonic mixer, diode assembly, Schottky barrier diode (SBD), conversion losses, nonlinear element, calculation.

References

1. Benson K. The use of the EHF band in 5G communication systems. SVCh-elektronika. 2021. No. 2. Pp. 54–57.
2. Sipp K. Mixers and modulators in high-speed communication systems. Elektronnye komponenty. 2011. No. 4. Pp. 90–95.
3. Dinges S.I., Kochemasov V.N. Devices for extending the operating frequency range of measurement equipment. Part 2. SVCh-elektronika. 2018. №3. Pp. 43–51.
4. Even harmonic mixers (EHM) [Electronic source]. URL: <https://www.vadiodes.com/en/products-6/mixers-shm-ehm-and-fm> (access date: 05.01.2025).
5. Harmonic mixers (WHMB) [Electronic source]. URL:<https://farran.com/farran-products/harmonic-mixers-whmb/> (access date: 05.01.2025).
6. High performance waveguide mixers: instruction manual, Part No. 070-3731-01. Product Group 26. Tektronix. USA, 1983. 73 p.
7. Spectrum analyzer harmonic mixers [Electronic source]. URL: <https://www.talentmw.com/en/productTable.html?cid1=6&cid2=22&cid3=140> (access date: 05.03.2025).
8. Waveguide IQ mixer [Electronic source]. URL:https://www.atmicrowave.com/index.php/products_32/155.html (access date: 05.03.2025).
9. Karpov Yu.A. Mixers, converters, multipliers and dividers of the microwave range of domestic production. Komponenty i tekhnologii. 2008. No. 9. Pp. 22–27.

10. *Bad'in A.V., Moskalenko V.D., Pidotova D.A.* Electrophysical characteristics of a sub-THz diode with a Schottky barrier. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference. 2020. № 1-1. Pp. 129–132.
11. *Strikha V.I., Buzaneva E.V., Radzievskiy I.A.* Semiconductor devices with the Schottky barrier. Moscow: Sov. radio, 1974. 248 p.
12. *Bilinskiy K.V., Emel'yanov E.V., Sbrodov A.V.* Investigation of the influence of the design of an anti-parallel pair of schottky barrier diodes on the conversion loss of a 3-mm band harmonic mixer. TUSUR reports. 2024. Vol. 27, No. 1. Pp. 13–22.
13. Pat. RU No. 234225. Harmonic mixer. *Bilinskiy K.V., Emel'yanov E.V., Burmistrova V.A.* et al. Appl. 09.10.2024; publ. 22.05.2025. Bul. No. 15.
14. ZIPSIL. Electromagnetic compatibility materials. Product catalog 2024, «RT-Tekhnologii» company [Electronic source]. URL: rt-docs.ru/wp-content/uploads/2023/01/katalog-produktsii-ZIPSIL.pdf (access date: 07.01.2025).
15. *Bilinskiy K.V.* Development of frequency converters for the EHF range: dis. ... PhD in Engineering. Tomsk, 2024. URL: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/h8g5nfcv> (access date: 06.01.2025).
16. *Lantsov V.N.* A New Method and Algorithm for Solving Harmonic Balance Equations // Radioengineering and telecommunication systems. 2019. No. 4. Pp. 27–31.
17. Advanced Design System (ADS) [Electronic source]. URL: https://dipaul.ru/catalog/element/advanced_design_system_ads/ (access date: 07.01.2025).
18. *Semenov E.V., Malakhovskiy O.Yu., Bozhkov V.G.* A non-quasi-static diode model taking into account extraction and recombination currents of nonequilibrium charge carriers. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2019. Vol. 22, No. 4. Pp. 26–32.
19. Keysight Technologies N5293AX03 [Electronic source]. URL: <https://www.electrorent.com/eu/products/rf-and-microwave-network-analyzers/test-sets/keysight-technologies/n5293ax03/01t1O00000BIGQZQA5> (access date: 10.01.2025).
20. Keysight N1913A and N1914A. Data Sheet [Electronic source]. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1843836.pdf> (access date: 10.01.2025).
21. *Pivak A., Repin A.* Measurement of parameters of amplifiers, mixers and differential devices using a vector network analyzer. Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes. Ser. Kontrol' i izmereniya. 2018. No. 5. Pp. 120–127.
22. U8489A Thermocouple DC Power Meter up to 120 GHz with USB Bus [Electronic source]. URL: https://dipaul.ru/catalog/element/u8489a_termoparnyy_izmeritel_moshchnosti_postoyannogo_toka_do_120_ggts_s_shinoy_usb/ (access date: 10.01.2025).