

Формирование и усиление сигналов

УДК 621.372.632

РАСЧЁТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО УДВОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

50-75 ГГц НА ДИОДНОЙ МИКРОСБОРКЕ

Березин Виталий Витальевич

АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Н. Новгород, инженер 1 категории, аспирант кафедры электроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: vvb87@yandex.ru.

Адрес: 603950, Нижний Новгород, улица Шапошникова, 5.

Щитов Аркадий Максимович

АО «ФНПЦ ННИПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова», ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: schitoff@mail.ru.

Адрес: 603950, Нижний Новгород, проспект Гагарина, 176.

Аннотация: Рассмотрены схемно-конструктивные особенности широкополосного волноводного удвоителя частоты КВЧ-диапазона 50-75 ГГц. Выполнено моделирование диодной интегральной микросборки, содержащей в одном кристалле умножительные диоды с цепями автосмещения. Осуществлены расчёт и проектирование удвоителя частоты 50-75 ГГц на диодной микросборке. Приведено сравнение расчётных параметров удвоителя частоты с экспериментальными данными, показавшее хорошее совпадение по эффективности преобразования. Исследовано влияние параметров диодов, их неидентичности, номиналов цепей автосмещения на основные технические характеристики удвоителя частоты: эффективность преобразования, неравномерность АЧХ, уровень паразитных гармоник в спектре выходного сигнала и т.п. Разработанный широкополосный удвоитель частоты 50-75 ГГц на диодной микросборке по своим техническим характеристикам не уступает лучшим отечественным и зарубежным аналогам.

Ключевые слова: Удвоитель, умножитель, проектирование СВЧ устройств, электродинамический расчёт волноводных структур, нелинейный анализ удвоителя, диодный волноводный удвоитель частоты, диодная интегральная микросборка.

Введение

Развитие современной радиоэлектроники идёт по пути освоения всё более высоких частот электромагнитных колебаний [1]. Сегодня чаще всего используется СВЧ-диапазон и продолжается интенсивное освоение нижней, средней и верхней (терагерцевой) частей КВЧ-диапазона. СВЧ- и КВЧ-аппаратура применяется в радиоизмерительной технике, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, радиоспектроскопии и т.д. Создание аппаратуры указанных диапазонов опирается на совершенствование технологий и элементной базы [2, 3]. В ОАО «НПП «Салют» (г. Н. Новгород) были разработаны монолитные интегральные

микросборки для широкополосных волноводных удвоителей частоты [4].

С появлением современной элементной базы была предпринята попытка распространить методику расчёта и проектирования волноводных диодных умножителей частоты [5-9] на удвоители частоты, выполненные на диодных микросборках. Методика базируется на САПР, совмещающей электродинамическое моделирование (расчёт методом конечных элементов) и нелинейный анализ (расчёт методом гармонического баланса). Использовались продукты компании Ansys (программы HFSS и Designer). В программе HFSS решаются электродинамические задачи с пространственным распре-

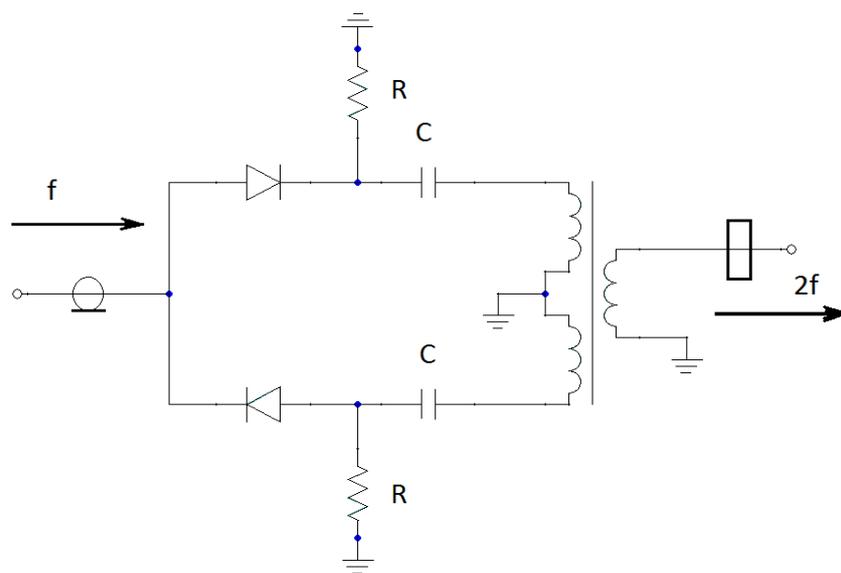


Рис. 1. Эквивалентная схема удвоителя 50-75 ГГц

делением полей, а в программе Designer проводится нелинейный анализ. Связь между программами осуществляется через сосредоточенные порты.

Схемно-конструктивные особенности удвоителя частоты

Схематически удвоитель частоты выполнен по схеме двухполупериодного выпрямителя (рис. 1).

Конструктивно удвоитель выполнен на плате, помещённой в волноводный канал прямоугольного сечения $3,6 \times 1,8$ мм. Эскиз конструкции удвоителя показан на рис. 2а. Микросборка (рис. 2б) включена между комбинациями двух линий передачи: входной – копланарного волновода, и выходной – щелевой, плавно расширяющейся к выходу до размера узкой стенки волновода 1,8 мм. На расстоянии $\lambda_{\text{ср. вых.}}/4$ от микросборки со стороны входа установлена перемычка из фольги. На входе и выходе могут устанавливаться регулировочные пластины, металлизированные с верхней стороны.

Вход удвоителя – коаксиально-полосковый переход, выход – волновод $3,6 \times 1,8$ мм.

Конструктивно монолитная интегральная диодная микросборка выполнена на полупроводниковой структуре арсенид галлия - 4-й слой (рис.3). Первый слой представляют металлические обкладки конденсаторов цепей автосмещения. 2-й слой - это диэлектрик из-

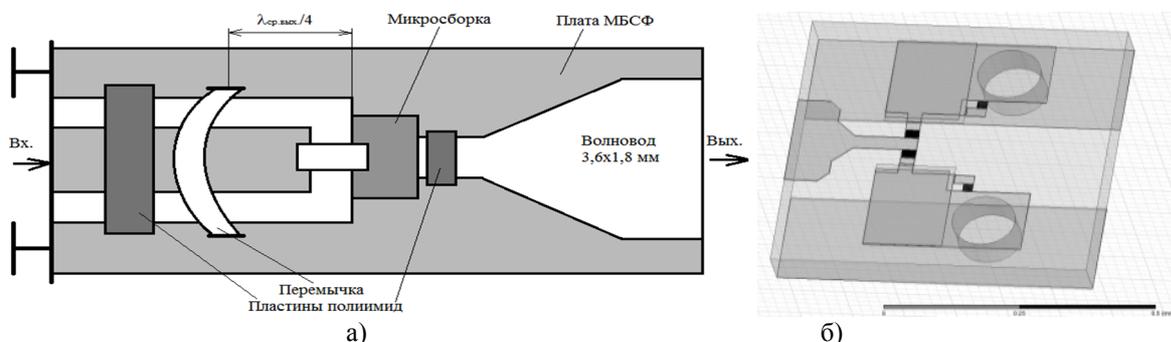


Рис. 1. а) – эскиз удвоителя частоты, б) – внешний вид микросборки

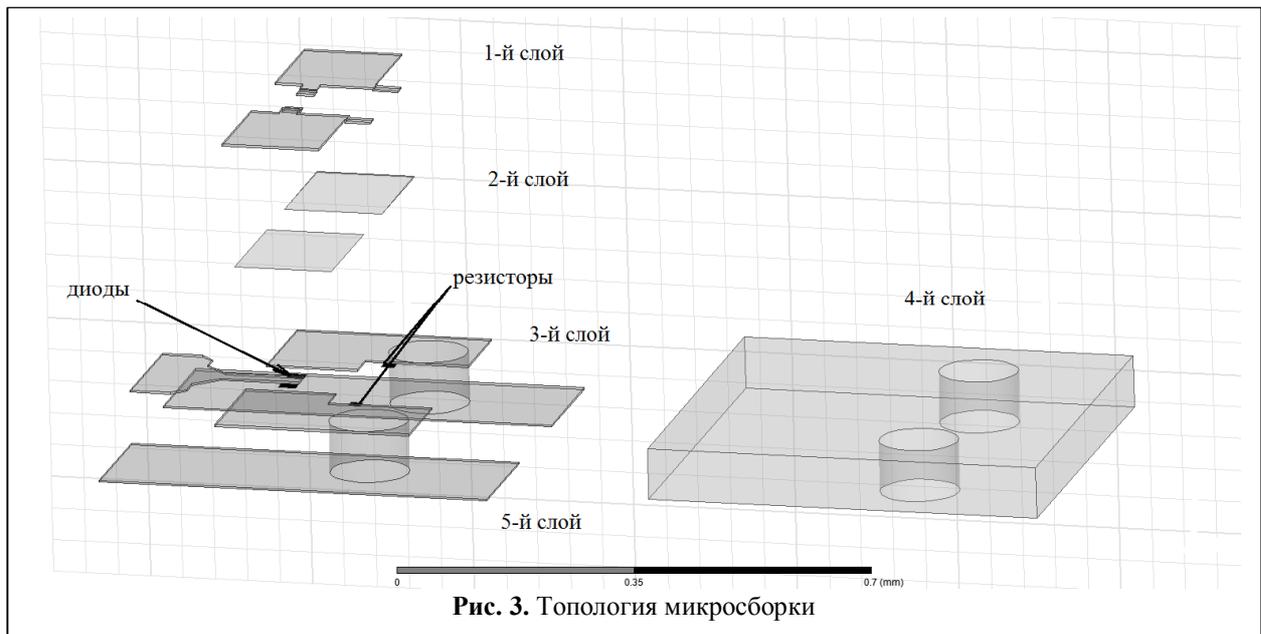


Рис. 3. Топология микросборки

нитрид кремния. На 3-ем слое расположены нижние обкладки конденсаторов и резисторы цепи автосмещения, также установлены диоды с входной линией. 5-й слой – контактные площадки, для монтажа.

Моделирование удвоителя частоты

Проведено моделирование удвоителя частоты с двухдиодной микросборкой на умножительных диодах. Модель выполнена в соответствии с размерами изготовленных образцов, учтены топологические особенности и электрические свойства, такие, как ёмкость (C) и сопротивление (R) цепей автосмещения, спроектированы модели диодов, основанные на измеренных характеристиках диодов (сопротивление (R_s) и

ёмкость $p-n$ перехода (C_n), ВФХ и ВАХ). На рис. 4 приведены результаты измерения выходной мощности (при $P_{вх} = 100$ мВт) удвоителя частоты на двухдиодной монолитной интегральной микросборке с умножительными диодами в сравнении с расчётной моделью. Там же показана выходная мощность удвоителя на дискретных диодах А92220-2.

Из сравнения результатов измерений следует, что в большей части рабочего диапазона выходная мощность удвоителя частоты на микросборке на 3-5 дБ больше по сравнению с $P_{вых}$ удвоителя на дискретных элементах, а расчётный уровень выходной мощности достаточно хорошо совпадает с экспериментальными результатами.

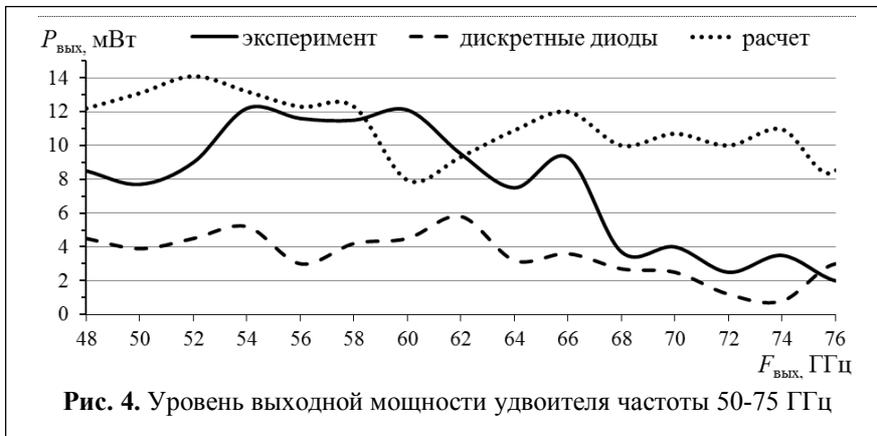
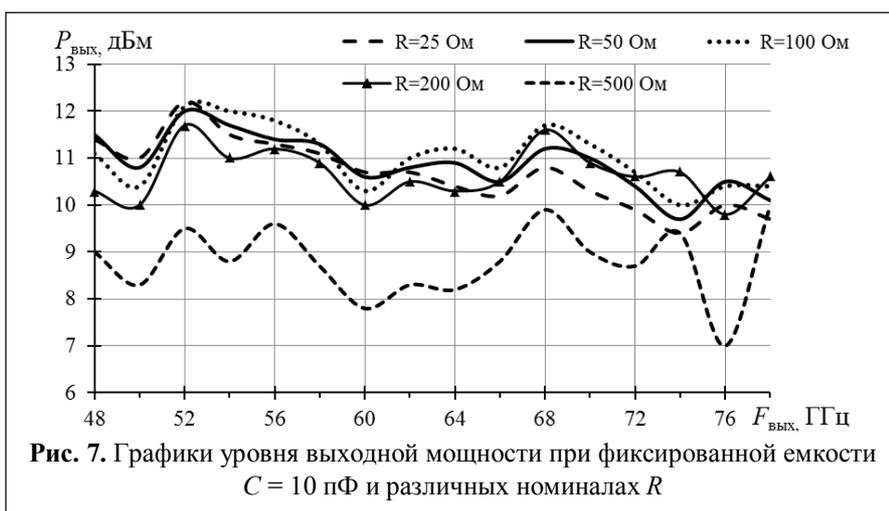
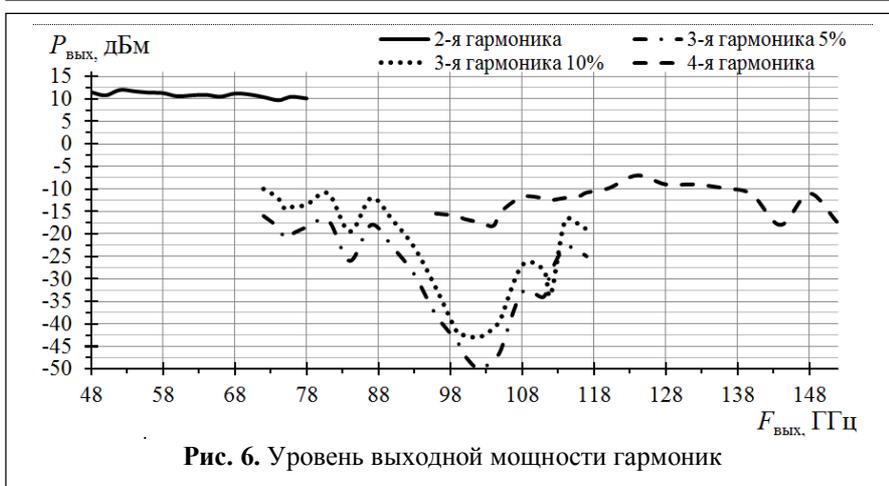
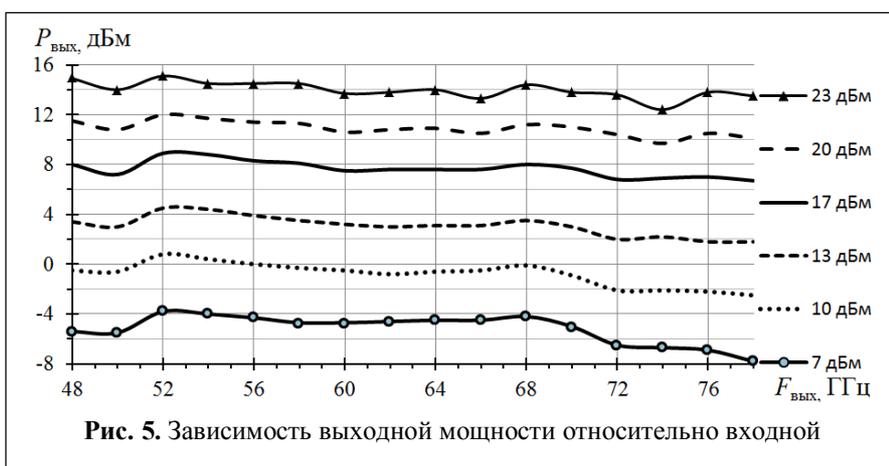


Рис. 4. Уровень выходной мощности удвоителя частоты 50-75 ГГц

Динамический диапазон выходной мощности относительно уровня мощности входного сигнала представлен на рис. 5. Графики показывают близкую к линейной монотонную зависимость $P_{вых}$ относительно $P_{вх}$, что соответствует практическим измерениям.



Измерение и расчёт подавления паразитных гармоник в спектре выходного сигнала для удвоителя на двухдиодной умножительной микросборке показывают (рис. 6), что первая гармоника входного сигнала подавлена на 30-50 дБ, третья – на 20-25 дБ при неидентично-

сти диодов в 10% по параметрам C_0 и R_s (C_0 – ёмкость диода при нулевом напряжении).

При минимально достижимой на практике неидентичности C_0 и R_s в 5% третья гармоника относительно второй подавлена на 27 дБ, а четвертая – на 20 дБ. Заметим, что в широкополосном удвоителе частоты 50-75 ГГц третья гармоника не может быть отфильтрована, поскольку находится в рабочем диапазоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки. Учитывая вышесказанное, найдена возможность повышения подавления 3-ей гармоника на ~10 дБ в рабочей полосе частот с помощью установки полиимидных пластин на щелевой линии (за микросборкой, см. рис. 2а), или использование вместо щелевой регулярной линии щелевой гребенчатой линии, но при этом происходит незначительное снижение уровня мощности 2-й гармоника на ~ 2 дБ.

На рис. 7 приведены характеристики выходного уровня мощности удвоителя в зависимости от параметров цепей автосмещения: $C = 10$ пФ и различных номиналах R .

Очевидно, оптимальным значением сопротивления для достижения равномерной $P_{\text{вых}}$ при $P_{\text{вх}} = 100$ мВт является 50 Ом.

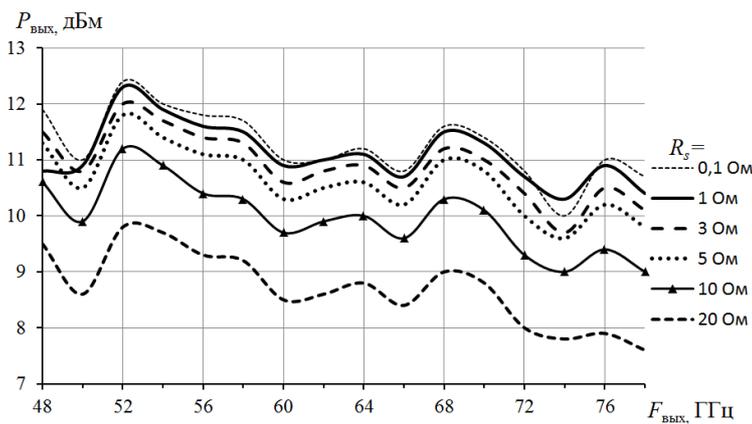


Рис. 9. Уровень выходной мощности при $P_{вх} = 100$ мВт, $C_0 = 0,05$ пФ и различных R_s

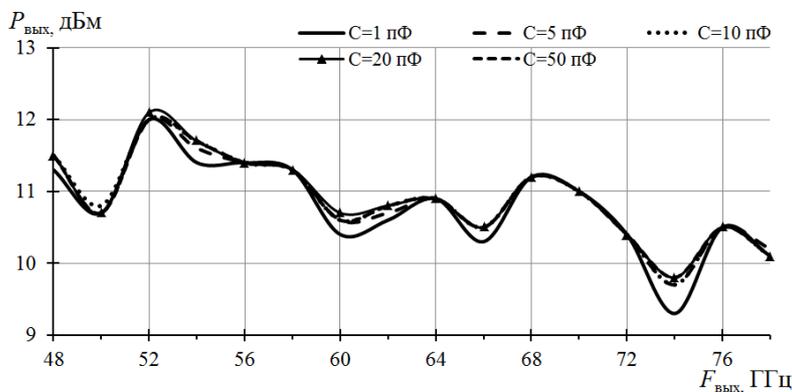


Рис. 8. Графики уровня выходной мощности при фиксированном сопротивлении $R = 50$ Ом и различных номиналах C

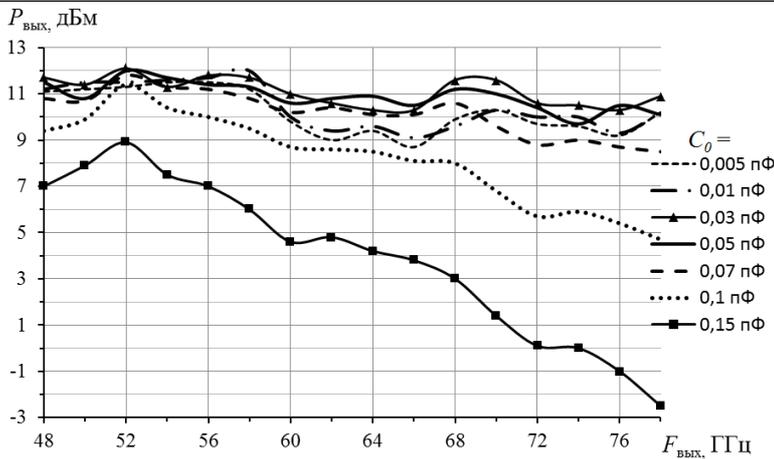


Рис. 10. Уровень выходной мощности при $P_{вх} = 100$ мВт, $R_s = 3$ Ом и различных C_0

На рис.8 представлены зависимости уровня выходной мощности при $R = 50$ Ом и различных номиналах C .

При вариации ёмкости в широких пределах от 1 пФ до 50 пФ результат практически не изменяется. Исследование происходило без

изменения топологии микросборки, при установке номиналов резисторов изменялось удельное сопротивление резистивного слоя Ом/м, а варьирование номинальными значениями емкостей осуществлялось путём изменения диэлектрической проницаемости.

На рис. 9 приведены расчётные характеристики уровня выходной мощности для различных значений R_s диодов при фиксированном $C_0 = 0,05$ пФ, а на рис. 10 – для различных C_0 при $R_s = 3$ Ом.

Очевидно, что одновременное уменьшение C_0 и R_s для повышения эффективности преобразования умножителя невозможно без снижения допустимой мощности рассеяния диодов. Поэтому, оптимальные значения C_0 и R_s для данного диапазона частот удвоителя и максимального уровня входной мощности 100 мВт выбираются из компромисса: $C_0 = 0,05$ пФ и $R_s = 3$ Ом.

Чтобы оценить все преимущества и недостатки удвоителей частоты на микросборках, проведём сравнение с существующими на данный момент зарубежными и отече-

ственными аналогами умножителей частоты, работающими в диапазоне частот 50-75 ГГц. Исходные материалы для сравнения взяты из каталогов продукции фирм, занимающихся производством и серийным выпуском различных СВЧ-устройств, в том числе и умножите-

Таблица 1. Сравнение характеристик умножителей частоты

Характеристики	Фирма-производитель			Удвоитель на микросборке	Расчетный вариант на микросборке
	ННИПИ "Кварц"	Virginia Diodes, inc. ¹⁾	Millitech		
Модель	7008	WR15X2	MUD-15		
Диапазон входных частот, ГГц	25-37,5	25-37,5	25-37,5	25-37,5	25-37,5
Диапазон выходных частот, ГГц	50-75	50-75	50-75	50-75	50-75
Коэффициент умножения	2	2	2	2	2
Уровень входной мощности, мВт	50	250-1000	100	100	100
Уровень выходной мощности, мВт	1,5	-	2,5	4-12	8-14
Потери преобразования (макс.), дБ	15	10.5	16	14	11
Неравномерность выходной мощности, дБ	±2	±1,5	±1,5	±2,5	±1,25
Подавление паразитных гармоник (мин.), дБс	20	20	25	22	27 ²⁾

¹⁾ активный умножитель частоты, ²⁾ при неидентичности диодов в 5%

лей частоты [10-12]. Характеристики сравниваемых умножителей представлены в таблице 1.

Из таблицы следует, что удвоитель частоты, изготовленный на монолитной диодной микросборке, не уступает по основным техническим характеристикам образцам зарубежных фирм-лидеров данного сегмента.

Выводы

Разработанные монолитные интегральные диодные микросборки для умножения частоты являются новой элементной базой для устройств КВЧ-диапазона. Они позволяют повысить выходную мощность умножителей и существенно снизить трудоемкость монтажа.

На основе сравнения результатов рис. 4, 5 и 6 можно заключить, что представленная в [5-9] методика проектирования и расчёта широкополосных волноводных умножителей частоты позволяет осуществлять расчёт и моделирование умножителей частоты, построенных на диодных интегральных микросборках.

Литература

1. Перспективы совершенствования радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона: монография / О.П. Павловский, В.А. Коршунов, А.Е. Львов, И.Г. Мальтер, А.В. Черногулов, А.М. Щитов. – М.: Радиотехника, 2012. – 272 с.

2. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная база: монография / А.М. Кудрявцев [и др.]; под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.

3. Дюков Д.И., Чеченин Ю.И., Крицкий Н.С. Разработка преобразователей частоты в монолитном исполнении на основе базовой технологии создания GaAs монолитных интегральных схем с диодами Шоттки вертикальной конструкции // XVIII Координационный научно-технический семинар по СВЧ технике: материалы. – Нижегородская обл., п. Хахалы, 2013. – С. 52.

4. Щитов А.М., Дюков Д.И., Чеченин Ю.И. Широкополосные умножители частоты КВЧ-диапазона на интегральных диодных микросборках // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника – 2015. – Вып. 4 (527). – С. 50-57.

5. Березин В.В., Щитов А.М. Широкополосный диодный волноводный удвоитель частоты 26-40 ГГц. Автоматизированный расчёт и проектирование // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. № 4. С. 68-73.

6. Щитов А.М. Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов: монография / А.М. Щитов [и др.]; под ред. А.М. Щитова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. – 196 с.

7. Березин В.В., Щитов А.М., Оболенский С.В. Методика расчёта и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц // Информационные системы и технологии (ИСТ-2015): материалы XXI международной науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 2015. – С. 62-63.

8. Щитов А.М., Березин В.В. Автоматизированный расчёт широкополосных волноводных диодных утроителей частоты в диапазонах 75-110 и 110-170 ГГц // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015): материалы 25-й Междунар. Крымской конф.: в 2 т. – Севастополь (Крым, РФ), 2015 – Т.1. – С. 75-76.

9. Березин В.В., Щитов А.М. Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроите-

ля частоты 75-110 ГГц // Физика волноводных процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Вып. 4. – Т. 18. – С. 11-17.

10. Коаксиальные волноводные и оптические устройства // Каталог НИИПИ «Кварц». – Н.Новгород, 2014.

11. www.vadiodes.com

12. www.millitech.com

Поступила 12 декабря 2016 г.

English

Calculating and designing the broadband diode micro-assembly based 50-75 GHz frequency doubler

Vitaly Vitalyevich Berezin – JSC FNPTS NNIIRT, N. Novgorod Category 1 Engineer, Post-graduate student of Department of Electronics, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod.

E-mail: vvb87@yandex.ru.

Address: 603950, Nizhny Novgorod, Shaposhnikov Street, 5.

Arkady Maksimovich Shchitov – JSC FNPTS The Institute of Electronic Measurements (IEM) KVARZ named after A.P. Gorshkov Leading Researcher, Dr. of Eng., Senior scientist researcher.

E-mail: schitoff@mail.ru.

Address: 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Avenue, 176.

Abstract: Calculating and designing the broadband diode micro-assembly based 50-75 GHz frequency doubler" is dedicated to topical issues of modeling non-linear microwave and extreme high frequency band based devices using new hardware components that is the diode micro-assemblies containing the most critical part of the designed device alongside with nonlinear elements (diodes) (R, C- self-bias circuits and supply lines for connection). When modeling the broadband waveguide frequency doubler, the technique was used which had earlier been proposed by authors and which is CAD based combining electrodynamic modeling (finite-element calculation method) and the nonlinear analysis (harmonic balance calculation method). The frequency doubler design features are examined, modeling of diode integral micro-assembly is executed and the calculation and design of the 50-75 GHz frequency doubler is performed. Modeling technique enables to analyze the effect of the device design features and of diode parameters including their non-identity as well as their VCC and CVC nonlinearity nature on the frequency doubler's basic technical characteristics: conversion efficiency, AFC unevenness, parasitic harmonics level in the output spectrum. And that analysis can be performed avoiding expensive and labor-consuming experimental research. The analysis resulted in the selection of the best option device. Comparison of the frequency doubler's estimated performance with experimental data indicates close agreement in conversion efficiency and parasitic components suppression level. Thus, using integral diode micro-assembly together with calculation and design proprietary know-how enables to develop frequency doublers in 50-75 GHz range with 4÷12 MW output power, and in the long term - 8÷14 MW with $P_{input\ signal} = 100\ MW$ and that exceeds the known domestic and foreign counterparts.

Key words: Doubler, multiplier, designing microwave devices, electrodynamic calculation of waveguide structures, doubler's nonlinear analysis, diode waveguide frequency doubler, diode integral micro-assembly

References

1. Updating perspectives of the millimeter-wave radio measuring equipment: monography. - O. P. Pavlovsky, V.A. Korshunov, A.E. Lvov, I.G. Malter, A.V. Chernogubov, A.M. Shchitov. - M.: Radiotekhnika, 2012. - 272 p.

2. Microwave and EHF radio measuring equipment. Nodal and element base: monography. - A.M. Kudryavtsev [and other colleagues]; Ed. by A.M. Kudryavtsev. - M.: Radiotekhnika, 2006. - 208 p.

3. Dyukov D.I., Chechenin Yu.I., Kritsky N.S. Development of monolithic frequency converters based on core technology of developing GaAs monolithic integrated circuits with vertically structured Schottky diodes. - XVIII Alignment scientific and technical seminar on the Microwave equipment: materials. - Nizhny Novgorod Region, Hakhala, 2013. – P. 52.

4. Shchitov A.M., Dyukov D. I., Chechenin Yu.I. Broadband EHF multipliers based on integral diode micro-assemblies. - Electronics. Ser. 1. The microwave engineering - 2015. - Issue 4 (527). – P. 50-57.

5. Berezin V.V., Shchitov A.M. Broadband diode waveguide 26-40 GHz frequency doubler. The automated calculation and design. - *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy*. 2016. T.21. No. 4. P. 68-73.
6. Shchitov A.M. Diode frequency converters for microwave and EHF radio measuring equipment: monography. A.M. Shchitov [and other colleagues]; Ed. by A.M. Shchitov; NSTU named after R. E. Alekseev. - Nizhny Novgorod. 2016. - 196 p.
7. Berezin V. V., Shchitov A.M., Obolensky S. V. Calculation and design methods of the waveguide diode 75-110 GHz frequency tripler. - *Information systems and technologies (IST-2015): materials of XXI international scientific and technical conference - Nizhny Novgorod, 2015.* – P. 62-63.
8. Shchitov A.M., Berezin V.V. The automated calculation of broadband waveguide diode 75-110 and 110-170 GHz frequency triplers. - *Microwave equipment and telecommunication technologies (Krymiko '2015): materials of the 25th Internat. Crimean conference.: in 2 v. - Sevastopol (the Crimea, the Russian Federation), 2015 - V.1.* – p. 75-76.
9. Berezin V.V., Shchitov A.M. Calculation and design methods of the waveguide diode 75-110 GHz frequency tripler. - *Physics of the waveguide processes and radio engineering systems.* - 2015. - Issue 4. - V. 18. – p. 11-17.
10. Coaxial wave-guide and optical devices. - *Catalogue of The Institute of Electronic Measurements (IEM) KVARZ.* - N. Novgorod, 2014.
- 11 [www .vadiodes.com](http://www.vadiodes.com)
- 12 www .millitech.com