



УДК 621.317:372.22

С. Ю. Молчанов

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

Н. М. Ушаков

*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники**им. В. А. Котельникова Российской академии наук*

А. П. Креницкий, В. П. Мещанов

*АО «Центральный научно-исследовательский институт
измерительной аппаратуры» (Саратов)*

Фильтр для миллиметрового диапазона длин волн с узкой полосой пропускания¹

Представлена математическая модель и описан макетный образец полосового фильтра с центральной частотой 140 ГГц. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных в диапазоне 75...260 ГГц. Описаны преимущества и недостатки представленного полосового фильтра по сравнению с известными.

Диапазон КВЧ, полосовой фильтр, нанокompозит, диэлектрическая проницаемость, периодическая структура

Современный этап развития радиотехники подразумевает переход на более короткие длины волн. Освоение верхней части миллиметрового диапазона является важным направлением развития радиотехнических устройств. Для успешного освоения миллиметрового диапазона требуется создание активных и пассивных элементов, в частности полосовых фильтров. Технологически важной задачей является разработка таких фильтров с малыми собственными потерями в заданной полосе пропускания и требуемой крутизной спада [1].

Активное развитие техники миллиметрового диапазона сдерживается, в т. ч. из-за отсутствия компонентной базы. Создание таких компонентов с использованием традиционных методологических и технологических подходов наталкивается на ряд проблем, связанных с малыми геометрическими размерами волноведущих систем, необходимостью установления жестких допусков при изготовлении компонентов, требованием высокого качества обработки рабочих поверхностей и др.

В настоящее время известные пассивные фильтры миллиметрового диапазона [2] имеют минимальное собственное ослабление на цен-

тральной частоте 1...3 дБ и полосу пропускания по уровню половины мощности (-3 дБ) не более 15-20 % относительно центральной частоты фильтра, что не удовлетворяет современным требованиям к крутизне спадов частотной характеристики фильтра. Для повышения крутизны спада в зоне непропускания нужно использовать каскад не менее, чем из двух фильтров [3], [4].

Для анализа физических процессов в подобных устройствах применяют сложные математические модели, реализация которых возможна только с привлечением вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения. Бурное развитие теории численных методов при решении уравнений математической физики привело к появлению значительного числа академических и лицензионных пакетов программ, позволяющих создавать и анализировать модели микроволновых устройств различного назначения. Наиболее популярными являются пакеты программ Comsol [5], ANSYS [6] и специализированные пакеты QuickWave-3D [7], HFSS [8], CSTMWS [9] и мн. др.

¹ Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 5907ГУ/2015 от 11.06.2015 г.).

Основой практически всех программ моделирования микроволновых устройств является метод конечных элементов (МКЭ). В [10] с помощью компьютерного моделирования удалось подобрать диэлектрическую вставку в виде полимерного нанокompозитного образца, которая позволяет улучшить крутизну характеристики каскада полосовых фильтров, не приводя к значительному увеличению собственного ослабления.

Целью настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование проблемы создания полосовых фильтров в коротковолновой части миллиметрового диапазона с использованием композитных наноматериалов.

Расчет и моделирование полосового фильтра. Для моделирования структуры с периодически повторяющимися фрагментами использованы каналы Флоке [11]. Под каналом Флоке понимается часть пространства, ограниченная вертикальными стенками, на которых установлены периодические граничные условия. Рассмотренная модель (рис. 1) сформирована из двух металлических прослоек 1, 2 с апертурными элементами в виде крестов 4 и диэлектрической прослойки 3 изменяемой толщины. Эффективная диэлектрическая проницаемость материалов рассчитывалась по моделям Коула–Коула, Дэвидсона–Коула для матрицы нанокompозита и по модели Максвелла–Гарнета для полимерного композита с нановключениями [12]. Численное моделирование необходимо для определения эффективной диэлектрической проницаемости с целью выбора оптимального нанокompозита. Синтезированный по указанным моделям [12] полимерный нанокompозитный образец имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon \approx 2$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta \approx 0.02$. Он заключен между проводящими металлическими поверхностями с апертурными элементами в виде крестов (рис. 2).

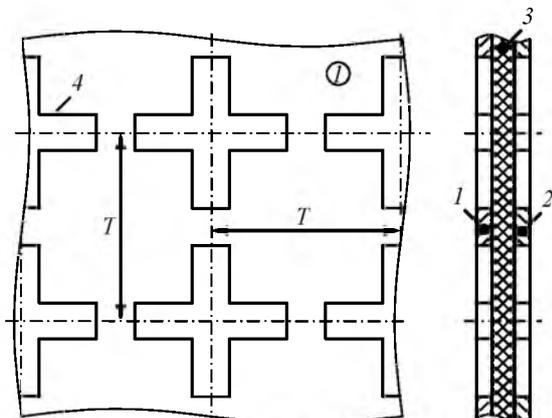


Рис. 1

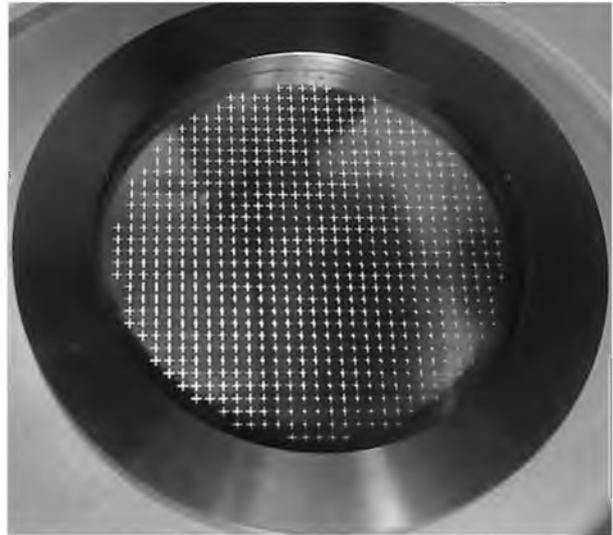


Рис. 2

Экспериментальное исследование. Для измерения коэффициента передачи полосового фильтра использовалось оборудование фирмы "Rohde&Schwarz": векторный анализатор цепей ZVA-40 и 3 пары преобразователей частоты (ZVA Z-110, ZVA Z-170 и RPG-260), работающих в диапазонах 75...110, 110...170 и 170...260 ГГц соответственно. Указанное оборудование позволяет измерять S -матрицу рассеяния в довольно большой частотной полосе, составляющей 185 ГГц.

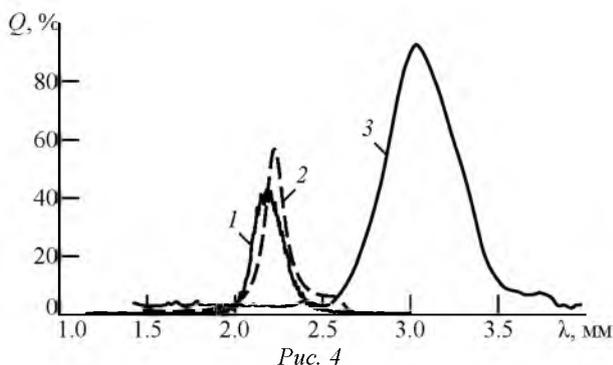
Пошаговая калибровка оборудования проходила после полного прогрева в течение примерно 30 мин (согласно технической документации) с использованием известных калибровочных мер фирмы "Rohde&Schwarz" (Kalibration kit WR10, WR6, WR4 для ZVA Z-110, ZVA Z-170 соответственно и RPG-260).

На рис. 3 представлена установка для измерения коэффициента передачи полосового фильтра в открытом пространстве по коэффициенту прохождения электромагнитной волны S_{21} S -матрицы рассеяния. Методика измерений, проводимых после калибровки, сводилась к следующему: между рупорных антенн 2 и 3, прикрепленных к волноводным секциям преобразователей частот 4 и 5, расположенных напротив друг друга, помещался полосовой фильтр 1. Зависимость ослабления прошедшей через фильтр волны от частоты наблюдалась на экране векторного анализатора 6. Погрешность измерений векторного анализатора и преобразователей частоты фирмы "Rohde&Schwarz" составляла не более 0.2 дБ.

Измеренный коэффициент пропускания полосового фильтра на основе периодической многослойной структуры и полимерного нанокompозита



Рис. 3



зитного материала приведен на рис. 4 (кривая 1). Пропускание полосового фильтра на длине волны 2160 мкм (центральная частота $f_{ц} = 138.8$ ГГц) составляет 44 % (вносимые потери около 3.8 дБ). Полоса пропускания по уровню -3 дБ менее 12 ГГц, т. е. меньше 9 % центральной частоты фильтра.

Для сравнения на рис. 4 приведена частотная характеристика полосового фильтра компании "TYDEX" [13] (кривая 3). Вносимые потери этого фильтра значительно меньше по сравнению с измеренным фильтром: максимальный коэффициент пропускания более 90 % против 44 % у экспериментального образца. Однако ширина полосы пропускания (около 20 % от центральной частоты) более чем в два раза проигрывает этому образцу.

Из приведенных теоретических и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что фильтр на основе периодических структур и нанокompозитных материалов имеет главное конкурентное преимущество – более узкую полосу по сравнению с фильтром компании "TYDEX". Различие характеристик теоретической модели фильтра и экспериментального образца (см. рис. 2, кривые 2 и 1 соответственно) можно объяснить недостаточной юстировкой при сборке образца и неточным вычислением комплексной диэлектрической проницаемости при моделировании.

В заключение следует отметить, что преимуществами измеренного фильтра является узкая полоса пропускания по уровню -3 дБ: 12 ГГц против 13.4 ГГц у аналогичного фильтра, но с воздушной прослойкой, а не с нанокompозитным веществом [4], [14], и меньшие габариты за счет меньшей толщины прослойки [15]. Для уменьшения собственных потерь фильтра и увеличения крутизны спада требуется в дальнейшем создание нового композитного материала с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь в области пропускания фильтра и с большим его значением на других частотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические особенности изготовления полотно-пропускающих фильтров, работающих в СВЧ-, КВЧ-диапазонах / Л. И. Обороина, А. Е. Романов, Б. К. Исмаилов, И. В. Стерехов, И. В. Трифанов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2010. Вып. 2(28). С. 125–130.
2. Kropotov G. I., Tsygankova E. V. TYDEX: optics for THz photonics // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Сер. Физика. 2010. Т. 5, № 4. С. 113–116.
3. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley, 2000. 153 p.
4. Исследование и разработка полосовых фильтров диапазона 0.1...0.2 ТГц / С. А. Алавердян, С. Ю. Молчанов, А. И. Довгань, А. П. Креницкий, В. П. Мещанов // Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами: материалы Всерос. науч. шк.-семинара. Саратов, 14–15 мая 2014 г. Саратов: Саратовский источник, 2014. С. 207–211.
5. www.comsol.com (дата обращения 28.11.2016).
6. www.ansys.com (дата обращения 28.11.2016).
7. www.qwed.com.pl (дата обращения 28.11.2016).
8. www.ansys.com (дата обращения 28.11.2016).
9. www.cst.com (дата обращения 28.11.2016).
10. Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М. Создание узкополосного фильтра терагерцового диапазона на основе нанокompозитных материалов и частотно-селективных проводящих поверхностей // Радиотехника. 2015. № 7. С. 55–57.
11. Курушин А. А. Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 11. С. 1–22.
12. Ушаков Н. М., Молчанов С. Ю. Моделирование диэлектрических свойств толсто пленочных полимерных нанокompозитов на основе полиэтилена низкой плотности в УВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах радиоволн // Радиотехника. 2014. № 10. С. 63–67.
13. www.tydexoptics.com/en/products/thz_optics/thz_band_pass_filter (дата обращения 28.11.2016).
14. Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М. Узкополосный СВЧ-фильтр для миллиметрового диапазона длин волн // Academic science – problems and achievements: Proc. of the VII Conf. North Charleston, USA, 28–29.09.2015. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. Vol. 1. P. 162–165. (In Russian.)
15. Fabrication and characteristics of mesh band-pass filters / M. A. Tarasov, V. D. Gromov, G. D. Bogomolov, E. A. Otto, L. S. Kuzmin // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52, iss. 1. P. 74–78.

S. Yu. Molchanov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

N. M. Ushakov

Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

A. P. Krenitskiy, V. P. Meshanov

Central Institute of Measurement Equipment (Saratov)

Filter for Millimeter Waves with Narrow Bandwidth

Mathematical model and model sample of the bandpass with central frequency of 140 GHz were presented. Comparison of theoretical and experimental data in the range of 75...260 GHz was made. Advantages and shortcomings of the presented filter in comparison with the existing bandpasses were described.

Extremely high frequency, bandpass filter, nanocomposite, dielectric permittivity, periodic structure

Статья поступила в редакцию 03 октября 2016 г.