

**Молчанов С.Ю.<sup>1,3</sup>, Н.М. Ушаков Н.М.<sup>1,2</sup>,  
Алавердян С.А.<sup>3</sup>, Мещанов В.П.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН

<sup>3</sup>Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры

## **КВЧ полосовой фильтр на основе периодических структур и композитного наноматериала**

*Представлен полосовой фильтр на основе металлических пластин с вырезами в виде периодически повторяющихся элементов и нанокompозитного материала, а также его трёхмерная модель. Измерен коэффициент передачи данного многослойного полосно-пропускающего фильтра в диапазоне 75-260 ГГц. Приведены сравнение теоретических и экспериментальных характеристик фильтра, конкурентные преимущества и недостатки по сравнению с аналогами.*

**Ключевые слова:** СВЧ, полосовой фильтр, нанокompозит, диэлектрическая проницаемость, терагерц.

Освоение терагерцового (THz) диапазона является приоритетным направлением для высокочастотных систем. Технологические успехи в создании качественных элементов будут определять уровень развития всей миллиметровой техники. Технологически важной задачей является разработка полосно-пропускающих фильтров с малыми собственными потерями в заданной полосе пропускания и хорошей крутизной спада [1].

Бурное развитие техники миллиметрового диапазона сдерживается в том числе и 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 пассивные фильтры THz диапазона имеют следующие параметры [2]:

- минимальное (собственное) ослабление на центральной частоте -1 дБ (dB);
- полоса пропускания по уровню -3дБ не более 15-20% от центральной частоты фильтра.

Для современных потребностей крутизны фильтра недостаточно. Для улучшения спада в зоне непропускания нужно использовать каскад из 2-х фильтров [3,4].

Для анализа физических процессов в сложных устройствах применяют математические модели высокого уровня сложности, 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. Самые популярные пакеты программ: Comsol ([www.comsol.com](http://www.comsol.com)), ANSYS ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)) и специализированные пакеты: QuickWave-3D ([www.qwed.com.pl](http://www.qwed.com.pl)), HFSS ([www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)), CSTMWS ([www.cst.com](http://www.cst.com)) и многие другие. Основой практически всех программ для моделирования микроволновых устройств является метод конечных элементов (МКЭ).

В работе [5] с помощью компьютерного моделирования удалось подобрать диэлектрическую вставку в виде полимерного нанокompозитного образца, которая позволяет улучшить крутизну каскада полосовых фильтров, не приводя к значительному увеличению собственного ослабления (Рис.1).

Для моделирования структуры с периодически повторяющимися фрагментами были использованы каналы Флоке [6]. Под каналом Флоке понимается часть пространства, ограниченная вертикальными стенками, на которых установлены периодические граничные условия. Данная модель сформирована из 2х металлических прослоек с апертурными элементами в виде крестов и диэлектрической изменяемой прослойки.

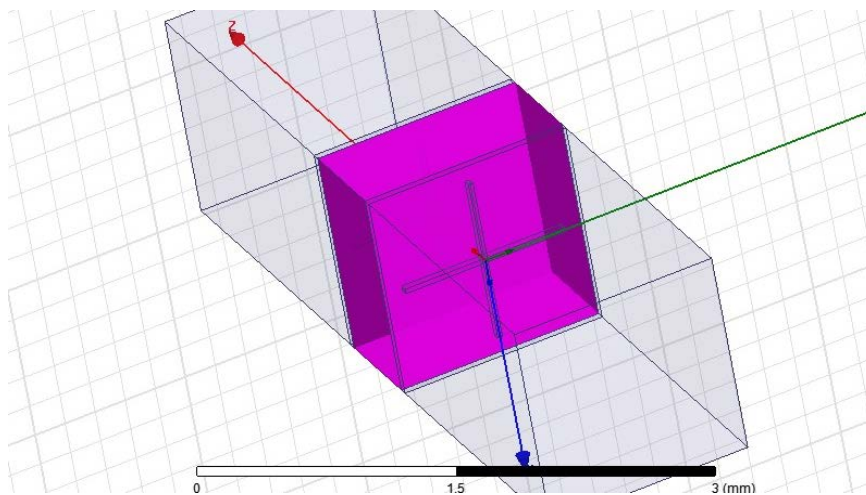


Рис. 1. Трехмерная модель двухслойного узкополосного фильтра с диэлектрической прослойкой.

Эффективную диэлектрическую проницаемость материалов рассчитывали по моделям Коула-Коула, Дэвидсона-Коула для матрицы нанокompозита и по модели Максвелла-Гарнета для полимерного композита с нано-включениями [7]. Численное моделирование необходимо, для примерного нахождения эффективной диэлектрической проницаемости будущего нанокompозита.

Синтезированный полимерный нанокompозитный образец по моделям, приведённым выше и рассматриваемым в [7] имеет  $\epsilon \approx 2$  и  $\text{tg} \delta \approx 0.02$ . Он заключен между проводящими металлическими поверхностями с апертурными элементами в виде крестов (Рис.2).

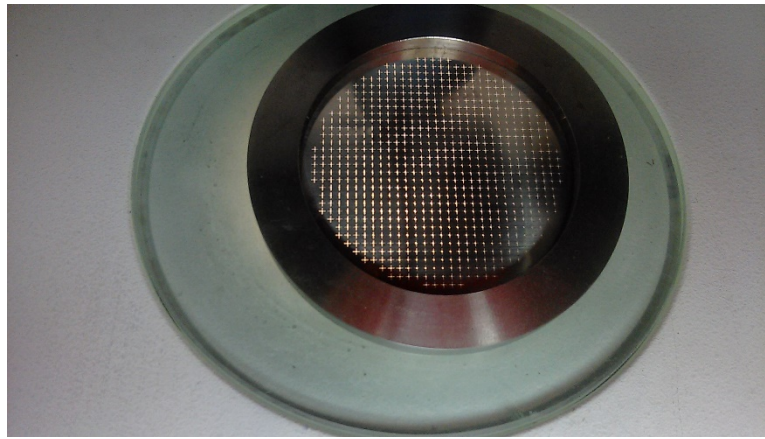


Рис. 2. Полосовой фильтр с центральной частотой 0,14 ТГц.

Для измерения коэффициента передачи полосового фильтра использовалось следующее оборудование фирмы Rohde&Schwarz: векторный анализатор цепей ZVA-40 и 3 пары преобразователей частоты (ZVA Z-110, ZVA Z-170 и RPG-260), работающие в диапазонах 75-110, 110-170 и 170-260 ГГц (GHz) соответственно. Таким образом, данное оборудование позволяет измерять S-матрицу рассеяния на довольно большом частотном отрезке, равным 185 ГГц.

Пошаговая калибровка оборудования происходила после его полного прогрева согласно технической документации (около 30 минут) с использованием известных калибровочных мер фирмы Rohde&Schwarz (Kalibration kit WR10, WR6, WR4 соответственно для ZVA Z-110, ZVA Z-170 и RPG-260).

Измерение коэффициента передачи полосового фильтра проводилось в открытом пространстве по коэффициенту прохождения электромагнитной волны S<sub>21</sub> матрицы рассеяния (S-matrix) Рис.3. После калибровки методика измерений сводилась к следующему: между двух рупорных антенн, прикрепленных к волноводным секциям преобразователей частот, расположенных напротив друг друга, помещался полосовой фильтр. Зависимость ослабления прошедшей через фильтр волны от частоты наблюдали на экране векторного анализатора. Погрешность измерений векторного анализатора и преобразователей частоты фирмы Rohde&Schwarz составляет не более 0,2 дБ.



Рис. 3. Измерение полосового фильтра в открытом пространстве.

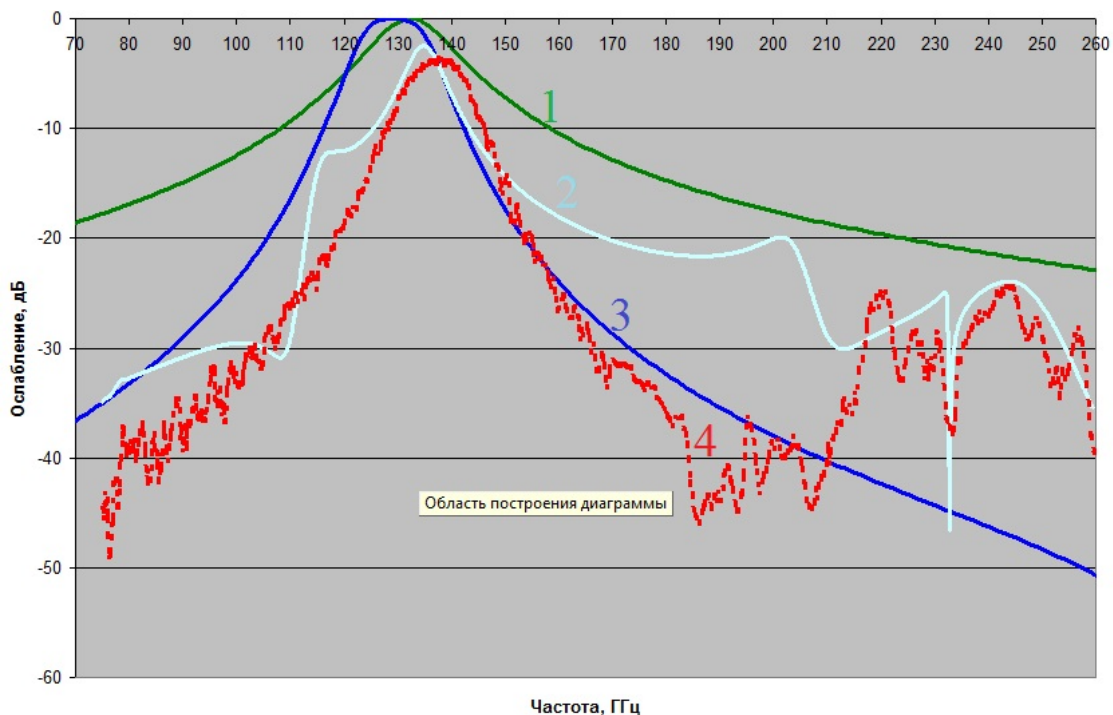


Рис. 4. Коэффициент передачи многослойного фильтра.

Измеренный коэффициент передачи полосового фильтра на основе периодической многослойной структуры и полимерного нанокompозитного материала приведен на Рис. 4 (кривая 4). Собственное ослабление полосового фильтра на центральной частоте  $f_{ц}=138.8$  ГГц порядка 4дБ. Полоса пропускания по уровню -3дБ от центральной частоты: менее 12 ГГц, т.е. меньше 9% от  $f_{ц}$ . Также на Рис. 3 изображены 3 теоретические кривые:

1. Теоретическая кривая двухслойного фильтра без прослойки;
2. Теоретическая кривая двухслойного фильтра с прослойкой из полимерного нанокompозитного образца определенной толщины;
3. Теоретическая кривая двухслойного фильтра с воздушной прослойкой определенной толщины.

Рассогласованность между теоретической моделью и экспериментальным образцом можно объяснить недостаточной юстировкой при сборке образца и не точным вычислением комплексной диэлектрической проницаемости при моделировании. Стоит отметить, что фильтр с нанокompозитным образцом имеет малое собственное ослабление и узкую полосу пропускания в области длины волны равной 2 мм.

Конкурентными преимуществами измеренного фильтра является узкая полоса пропускания по уровню -3дБ, 12 ГГц против 13,4 ГГц у фильтра с воздушной прослойкой [4,8] и меньшая толщина прослойки, согласно [9].

Для уменьшения собственных потерь фильтра и увеличения крутизны спада требуется создание нового нанокompозитного материала с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь в области пропускания фильтра и с большим его значением в на других частотах.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

#### Библиографический список

1. Оборина Л.И., Романов А.Е., Исмаилов Б.К., Стерехов И.В., Трифанов И.В. Технологические особенности изготовления полосно-пропускающих фильтров, работающих в СВЧ-, КВЧ-диапазонах

- // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Решетнева М.Ф., Красноярск, 2010, Выпуск 2, С.125.
2. Kropotov G.I., Tsygankova E.V. TYDEX: optics for THz photonics // Вестник Новосибирского Государственного Университета, серия: Физика, 2010, Т.5, №4, С. 113.
  3. Munk В.А. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design // Wiley, New York, 2000, P.153
  4. Алавердян С.А., Молчанов С.Ю. Довгань А.И., Креницкий А.П., Мещанов В.П. Исследование и разработка полосовых фильтров диапазона 0,1-0,2 ТГц // Материалы Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро и наноструктурами, материалами и биообъектами», Саратов, 2014, С. 207.
  5. Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М. Создание узкополосного фильтра терагерцового диапазона на основе нанокompозитных материалов и частотно-селективных проводящих поверхностей // Москва, Радиотехника, 2015, №7, С.55.
  6. Курушин А.А. Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры// «Журнал Радиозлектроники» №11, 2010, С.1-22.
  7. Ушаков Н.М., Молчанов С.Ю. Моделирование диэлектрических свойств толстопленочных полимерных нанокompозитов на основе полиэтилена низкой плотности в УВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах радиоволн // Москва, Радиотехника, 2014, №10, С63.
  8. Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М. Узкополосный СВЧ фильтр для миллиметрового диапазона длин волн // Материалы VII международной научно-практической конференции «Академическая наука – проблемы и достижения», USA, SC, North Charleston, CreatSpace, 2015, Т.1 С.162.
  9. Tarasov M.A., Gromov V.D., Bogomolov G.D., Otto E.A, Kuzmin L.S. Fabrication and characteristics of mesh band-pass filters // Instruments and Experimental Techniques, 2009, Vol. 52, No. 1, P. 74.