

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.372.2
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.58-60

Дата поступления: 13.09.2019
Дата принятия: 02.10.2019

Брэгговская элементная база электроники микроволнового и терагерцового диапазонов

С.А. Никитов¹, А.В. Скрипаль², Д.В. Пономарев²

¹ Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН
125009, Российская Федерация, г. Москва
ул. Моховая, 11, корп. 7

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
410012, Российская Федерация, г. Саратов
ул. Астраханская, 83

Предложен новый подход к построению элементной базы электроники микроволнового и терагерцового диапазонов, связанный с разработкой функциональных элементов радиоэлектроники на основе брэгговских структур. Отмечена возможность создания на основе брэгговских структур узкополосных фильтров заграждения, обладающих вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице. Описаны характеристики малогабаритных согласованных нагрузок, предназначенных для работы в микроволновом и терагерцовом диапазонах частот, на основе брэгговских структур, содержащих нанометровые металлические пленки. Рассмотрена возможность использования СВЧ фотонных кристаллов в качестве новых типов электродинамических систем при измерении параметров материалов и структур СВЧ-методами. При реализации методики измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков, основанной на использовании частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне, применен коаксиальный фотонный кристалл.

Ключевые слова: брэгговская элементная база, микроволновый, терагерцовый диапазоны, фильтры заграждения, согласованные нагрузки, СВЧ-измерение материалов

Уникальные свойства брэгговских структур, часто называемых фотонными кристаллами, открывают новые возможности создания на их основе устройств с управляемыми в рекордно большом диапазоне параметрами, а также реализовать новые высокочувствительные бесконтактные методы измерения параметров материалов и нанобъектов. В качестве периодических элементов в брэгговских структурах различными авторами использовались прямоугольные волноводы, коаксиальные линии, отрезки микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий с изменяющимися геометрическими размерами [1].

Создание брэгговских структур с управляемыми амплитудно-частотными характеристиками открывает перспективу расширения области их применения в качестве фильтров микроволнового и терагерцового диапазонов.

Наличие явно выраженных запрещенных зон на характеристиках брэгговских структур позволяет использовать их в качестве полосовых фильтров заграждения. Фотонные кристаллы с нарушением периодичности структуры позволяют реализовать узкополосные фильтры пропускания.

В случае реализации системы на основе фотонных кристаллов с плоской разрешенной зоной, ✉ skripala_v@info.sgu.ru (Скрипаль Александр Владимирович)

то есть зоной, характеризующейся частотно-независимым коэффициентом прохождения электромагнитной волны, близким к единице, могут быть созданы узкополосные фильтры заграждения, обладающие вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице [2].

Одним из новых применений брэгговских структур в микроволновом и терагерцовом диапазонах является создание неотражающих поверхностей и широкополосных согласованных нагрузок. В качестве поглощающих элементов в существующих нагрузках обычно используют ферроэпоксидные композиты, обладающие большими потерями, или диэлектрические стержни с нанесенными на них слоями резистивного материала.

Для улучшения характеристик поглощения и уменьшения размера и веса согласованная нагрузка, выполненная на основе традиционного ферроэпоксидного поглотителя, может принимать различные структурные формы, такие как сужающиеся клинья, пирамидальные конструкции, многослойные и многозонные конструкции Т-типа в Н- и Е-плоскостях.

На мировом рынке производства и разработки согласованных нагрузок в сантиметровом и мил-

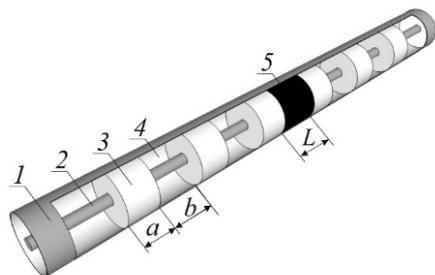


Рис. Конструкция одномерного коаксиального СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности: 1 и 2 – внешний и внутренний проводники; 3 и 4 – элементы, образующие периодическую структуру; 5 – нарушение

лиметровом диапазоне значительное место занимают компании Flann Microwave, SAGE Millimeter, Inc., Pasternack.

Ряд новых возможностей при создании СВЧ согласованных нагрузок сантиметрового и миллиметрового диапазонов открывается при использовании свойств структур с фотонной запрещенной зоной (брэгговских структур). Использование в брэгговских структурах нанометровых металлических пленок позволило создать малогабаритные согласованные нагрузки, работающие в диапазонах частот 8,15–12,05 ГГц, 12,05–17,44 ГГц, 17,44–25,95 ГГц с коэффициентом стоячей волны по напряжению КСВН $< 1,1$, в диапазонах частот 25,95–37,50 ГГц, 37,50–53,57 ГГц с КСВН $< 1,15$ и в диапазоне частот 140–210 ГГц с КСВН $< 1,3$ [3].

Одномерные СВЧ фотонные кристаллы могут быть использованы в качестве новых типов электродинамических систем при измерении параметров материалов и структур СВЧ-методами. В настоящее время разработаны методики по определению комплексной диэлектрической про-

ницаемости твердых диэлектриков и композитов, жидких диэлектриков и их растворов, электропроводности или толщины тонких металлических пленок и полупроводниковых структур [1; 4–7].

Авторы [8] использовали отрезок коаксиального кабеля с периодически расположенными отверстиями в его внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении для измерения температуры и диэлектрической проницаемости жидких материалов.

Авторами [9] реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ряда диэлектриков с использованием коаксиального фотонного кристалла, основанная на решении обратной задачи при использовании измеренных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне.

Рассматривались одномерные коаксиальные ФК (рис.), составленные из 11 слоев, в диапазоне частот 0–12 ГГц. Нечетные слои ФК представляли собой отрезки с диэлектрическим заполнением из тефлона, четные – отрезки с воздушным заполнением.

Таким образом, новый подход к построению элементной базы электроники микроволнового и терагерцового диапазонов заключается в использовании брэгговских структур в качестве нового типа функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ) и стипендии Президента РФ (СП-3301.2018.3).

Список литературы

1. One-Dimensional Microwave Photonic Crystals. New Applications / D.A. Usanov [et al.]. Boca Raton: CRC Press, 2019. 154 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429276231>.
2. Waveguide bandstop filters based on microwave photonic crystals with parameters controlled by n-i-p-i-n diodes / D.A. Usanov [et al.] // Journal of Communications Technology and Electronics. 2019. Vol. 64. № 4. P. 399–408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226919040107>.
3. Centimeter- and millimeter-wavelength matched loads based on microwave photonic crystals / D.A. Usanov [et al.] // Technical Physics. 2017. Vol. 62. № 2. P. 243–247. DOI: <https://10.1134/S106378421702027X>.
4. Determination of the metal nanometer layer thickness and semiconductor conductivity in metal-semiconductor structures from electromagnetic reflection and transmission spectra / D.A. Usanov [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 51. № 5. P. 644–649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784206050173>.
5. Determination of the conductance and thickness of semiconductor wafers and nanometer layers with the use of one-dimensional microwave photonic crystals / S.A. Nikitov [et al.] // Doklady Physics. 2013. Vol. 58. № 1. P. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335813010023>.
6. Multiparametric measurements of epitaxial semiconductor structures with the use of one-dimensional microwave photonic crystals / D.A. Usanov [et al.] // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. № 1. P. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226916010125>.
7. Microstrip photonic crystals used for measuring parameters of liquids / D.A. Usanov [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 55. № 8. P. 1216–1221. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784210080220>.

8. Nasybullin A.R., Morozov O.G., Sevastyanov A.A. Bragg sensory microwave structures on a coaxial cable // *Journal of Radio Electronics*. 2014. № 3. P. 1–17. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar14/8/text.pdf>.
9. СВЧ коаксиальные брэгговские структуры и их использование для измерения диэлектриков / Д.А. Усанов [и др.] // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2019. Т. 2. С. 194–198.

References

1. Usanov D.A. et al. *One-Dimensional Microwave Photonic Crystals. New Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2019, 154 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429276231>.
2. Usanov D.A. et al. Waveguide bandstop filters based on microwave photonic crystals with parameters controlled by n–i–p–i–n diodes. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 399–408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226919040107>.
3. Usanov D.A. et al. Centimeter- and millimeter-wavelength matched loads based on microwave photonic crystals. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 2, pp. 243–247. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378421702027X>.
4. Usanov D.A. et al. Determination of the metal nanometer layer thickness and semiconductor conductivity in metal-semiconductor structures from electromagnetic reflection and transmission spectra. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 51, no. 5, pp. 644–649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784206050173>.
5. Nikitov S.A. et al. Determination of the conductance and thickness of semiconductor wafers and nanometer layers with the use of one-dimensional microwave photonic crystals. *Doklady Physics*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335813010023>.
6. Usanov D.A. et al. Multiparametric measurements of epitaxial semiconductor structures with the use of one-dimensional microwave photonic crystals. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226916010125>.
7. Usanov D.A. et al. Microstrip photonic crystals used for measuring parameters of liquids. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 55, no. 8, pp. 1216–1221. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784210080220>.
8. Nasybullin A.R., Morozov O.G., Sevastyanov A.A. Bragg sensory microwave structures on a coaxial cable. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 3, pp. 1–17. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar14/8/text.pdf>.
9. Usanov D.A. et al. Microwave coaxial Bragg structure and their use for the measurement of dielectrics. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2019, vol. 2, pp. 194–198. [In Russian].

UDC 621.372.2

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.58-60

Received: 13.09.2019

Accepted: 02.10.2019

The Bragg element base of the microwave and terahertz electronics

S.A. Nikitov¹, A.V. Skripal², D.V. Ponomarev²

¹ Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov RAS

11-7, Mokhovaya Street

Moscow, 125009, Russian Federation

² Saratov State University

83, Astrakhanskaya Street

Saratov, 410012, Russian Federation

A new approach to constructing the elemental base of electronics in the microwave and terahertz ranges associated with the development of functional elements of radio electronics based on Bragg structures have been proposed. The possibility of creating narrow-band rejection filters based on Bragg structures with a frequency-independent transmission coefficient close to unity outside the stop band has been demonstrated. The characteristics of small-sized matched loads for operation in the microwave and terahertz frequency ranges based on Bragg structures containing nanometer metal films have been described. The possibility of using microwave photonic crystals as a new types of electrodynamic systems for measuring the parameters of materials and structures by microwave methods has been considered. The coaxial photonic crystal was used for implementing the method for measuring the complex permittivity of dielectrics, based on the use of the transmission and reflection frequency dependences at the frequency of the defect mode in the band gap.

Keywords: Bragg element base, microwave, terahertz ranges, rejection filters, matched loads, microwave measurement of materials.

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Область научных интересов: твердотельная, микро- и нано-электроника, физика твердого тела, магнетика.

E-mail: nikitov@cplire.ru

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Область научных интересов: микро-, нано- и СВЧ-электроника, диагностика микро- и наноструктур, методы неразрушающего контроля.

E-mail: skripala_v@info.sgu.ru

Пonomarev Денис Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Область научных интересов: микро-, нано- и СВЧ-электроника, диагностика микро- и наноструктур.

E-mail: ponomarev87@mail.ru