

13;15

## Согласованная нагрузка на брэгговских структурах терагерцевого диапазона частот

© Д.А. Усанов<sup>1</sup>, А.В. Скрипаль<sup>1</sup>, Д.В. Пономарев<sup>1</sup>,  
М.К. Мерданов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Научно-производственный центр „Электронное приборостроение“, Москва, Россия

E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2017 г.

Создана малогабаритная широкополосная волноводная согласованная нагрузка на основе брэгговских структур, содержащая последовательно расположенные нанометровые металлические и диэлектрические слои, предназначенные для использования в диапазоне частот 140–210 GHz. В этом диапазоне частот экспериментально получены значения коэффициента стоячей волны по напряжению менее 1.3.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45709.16979

Успешное развитие СВЧ-электроники во многом зависит от наличия соответствующей элементной базы. Одним из таких элементов, обеспечивающих функционирование СВЧ-устройств [1,2], является согласованная (неотражающая) нагрузка. Наилучшую перспективу практического применения имеют нагрузки, которые обладают совокупностью таких свойств, как широкополосность, низкий уровень отражаемой и высокий уровень рассеиваемой мощности, малые габариты. В качестве поглощающих элементов в существующих нагрузках обычно используются ферроэпоксидные композиты, обладающие большими потерями, или диэлектрические стержни с нанесенными на них слоями резистивного материала. Такие нагрузки не всегда удовлетворяют потребностям практики по габаритам, частотным характеристикам, стойкости к ударным воздействиям. Для обеспечения широкополосного согласования длина волноводных нагрузок должна в несколько раз превышать длину

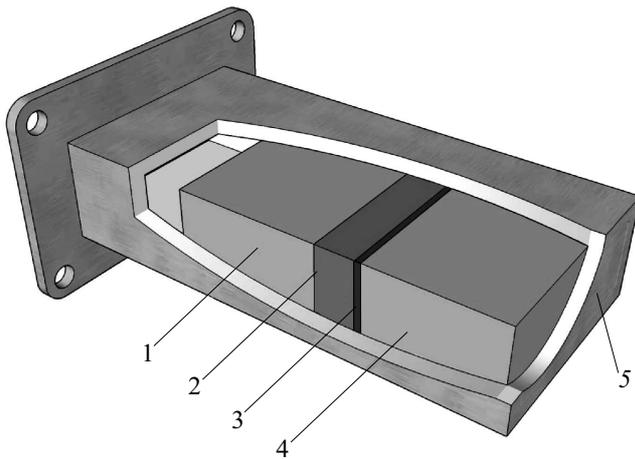
волны электромагнитного излучения во всем частотном диапазоне, в котором они используются. Геометрические размеры и электрофизические характеристики поглощающих элементов должны контролироваться с высокой точностью, что обуславливает повышенные требования к технологии их изготовления.

В сантиметровом диапазоне длин волн одним из недостатков существующих согласованных нагрузок являются их большие габариты, которые превышают в трехсантиметровом диапазоне длин волн 100 мм. При создании нагрузок в миллиметровом диапазоне длин волн и тем более в терагерцевом диапазоне возникают дополнительные трудности. Это связано с тем, что в указанных диапазонах наблюдается частотная зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей феррооксидных композитов и резистивных материалов, используемых в качестве поглощающих элементов.

Ряд новых возможностей при создании СВЧ согласованных нагрузок сантиметрового и миллиметрового диапазонов открывается при использовании свойств так называемых брэгговских структур с фотонной запрещенной зоной (СВЧ фотонных кристаллов) [3,4]. Отметим, что наряду с зоной, запрещенной для распространения волн в определенном диапазоне частот, как правило, вследствие почти полного отражения электромагнитной волны, для таких структур характерно наличие и разрешенной зоны. В частотном диапазоне разрешенной зоны волна не испытывает отражения и распространяется с малыми потерями. Однако в случае присутствия в таких структурах проводящих слоев (например, в виде нанометровых металлических пленок) при распространении волны в так называемой разрешенной зоне происходит ее поглощение. Такое свойство фотонных кристаллов авторами [5–9] было использовано для создания малогабаритных (с продольными размерами, не превышающими одной длины волны) согласованных нагрузок, работающих в диапазонах частот 8.15–12.05, 12.05–17.44, 17.44–25.95 GHz с коэффициентом стоячей волны по напряжению  $VSWR < 1.10$  и в диапазонах частот 25.95–37.50, 37.50–53.57 GHz с  $VSWR < 1.15$ .

В литературе отсутствуют сведения об использовании указанной выше возможности создания такого типа нагрузок для терагерцевого диапазона частот, работа в котором открывает новые перспективы практически значимых приложений [10–13].

Поэтому актуальной остается задача расширения диапазона рабочих частот малогабаритных согласованных нагрузок, включая терагерцевый, на основе фотонных кристаллов.



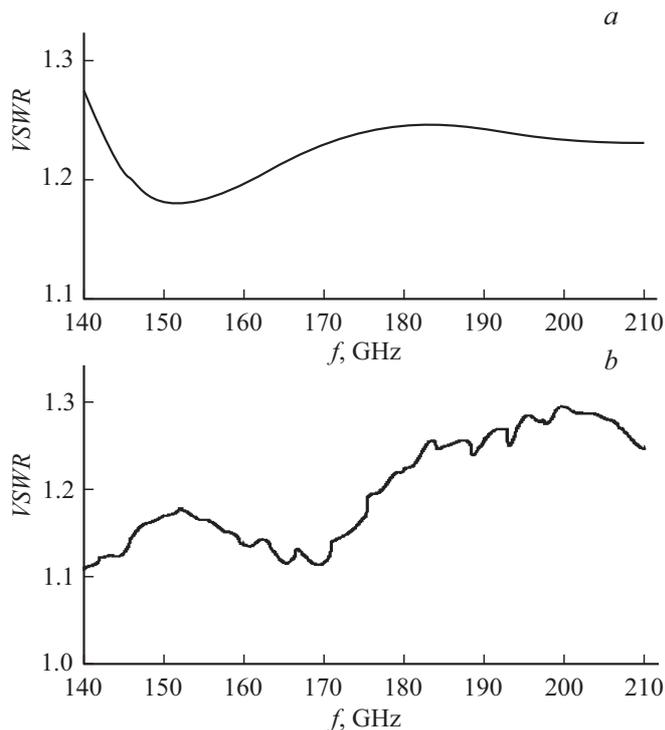
**Рис. 1.** Конструкция согласованной нагрузки, включающей сплошные диэлектрические слои ( $\epsilon$ : 1 — 2.0, 2 — 9.6, 4 — 2.0) и нанометровую металлическую пленку (3). 5 — корпус волновода. Сечение волноводного канала  $1.295 \times 0.648$  mm.

Задача настоящей работы — теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности создания в диапазоне частот 140–210 GHz согласованной нагрузки, состоящей из нанометрового металлического слоя с определенными значениями толщины и электропроводности и чередующихся диэлектрических слоев.

Согласованные нагрузки на основе фотонных кристаллов представляют собой отрезки прямоугольного волновода, полностью заполненные слоистыми структурами. Структуры состоят из чередующихся слоев диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости и нанометровых слоев металла с различными значениями толщины и удельной электропроводности.

Расчет коэффициента отражения электромагнитной волны при ее нормальном падении на слоистую металлодиэлектрическую структуру проводится с использованием матрицы передачи волны для  $N$ -слойной структуры, аналогично тому как это было сделано в [9,14,15].

Как следует из результатов расчета, выполненных на основе описанной в [9] модели, возможно создание согласованной нагрузки (рис. 1), обеспечивающей в диапазоне частот 140–210 GHz величину



**Рис. 2.** Расчетная (*a*) и экспериментальная (*b*) частотные зависимости  $VSWR$  в диапазоне 140–210 GHz.

$VSWR < 1.3$  (рис. 2, *a*) при линейных размерах нагрузки менее 0.9 mm. Необходимо отметить, что для создания диэлектрических слоев использовались широко применяемые на СВЧ диэлектрические материалы, такие как тефлон и поликор (керамика  $Al_2O_3$ ), обладающие малым значением тангенса угла диэлектрических потерь.

Результаты расчета приведены на рис. 2, *a*. При расчете полагалось, что диэлектрические слои 1, 2 и 4 полностью заполняли волновод по поперечному сечению, их толщины составляли 340, 150 и 340  $\mu m$ .

По данным численного эксперимента была изготовлена широкополосная волноводная согласованная нагрузка, в которой диэлектрические слои представляли собой, как это было выбрано при расчете,

слои керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2 = 9.6$  и толщиной  $150\ \mu\text{m}$ ) и тефлона (с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2 = 2.0$  и толщиной  $340\ \mu\text{m}$ ). Нанометровые металлические слои (Cr) напылялись на керамическую подложку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $150\ \mu\text{m}$ . Поверхностное сопротивление  $\rho$  нанометрового металлического слоя составляло  $75\ \Omega/\square$ .

Измерения частотных зависимостей VSWR (рис. 2, *b*) созданной согласованной нагрузки, предназначенной для использования в диапазоне частот 140–210 GHz, проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5242A и блоков расширения VDI WR 5.1.

Как следует из результатов эксперимента, созданная четырехслойная согласованная нагрузка, предназначенная для использования в диапазоне частот 140–210 GHz, имеет  $VSWR < 1.3$  при линейных размерах нагрузок менее 0.9 mm. Для дальнейшего уменьшения VSWR возможна дополнительная оптимизация структуры по  $\epsilon$ , толщинам и числу слоев.

Отметим, что выпускаемые отечественными производителями согласованные нагрузки в диапазоне частот от 118.1 до 178.4 GHz [16], наиболее близком к исследуемому в настоящей работе диапазону, обладая лучшими значениями  $VSWR < 1.1$ , имеют продольные размеры, более чем в 10 раз превосходящие размеры предложенной согласованной нагрузки. Согласованные нагрузки, выполненные с использованием клинообразного поглотителя, как отмечает производитель, могут выйти из строя вследствие механического повреждения поглощающего клина [16], например при воздействии ударных нагрузок. Их меньшая по сравнению с предложенными нагрузками ударная и виброустойчивость объясняется значительной площадью поверхности, не имеющей жестко фиксированной основы. Кроме того, предложенные нагрузки отличаются от известных возможностью применения хорошо разработанных технологий изготовления входящих в их состав элементов.

Таким образом, показана теоретически и подтверждена экспериментально возможность создания в диапазоне частот 140–210 GHz малогабаритной широкополосной согласованной нагрузки, состоящей из нанометрового металлического слоя с определенными значениями толщины и электропроводности и чередующихся сплошных диэлектрических слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ) и стипендии Президента РФ (СП-2622.2015.3).

## Список литературы

- [1] *Xelshajn J.* Passive and active microwave circuits. N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto: John Wiley & Sons, 1978. 284 p.
- [2] *Lee K.A., Guo Y., Stimson Ph.A., Potter K.A., Chiao J.-C., Rutledge D.B.* // IEEE Transact. Antennas Propagation. 1991. V. 39. N 3. P. 425–428.
- [3] *Joannopoulos I.D., Villeneuve Pierre R., Fan S.* // Nature. 1997. V. 386. N 13. P. 143–149.
- [4] *Yablonovitch E., Gmitter T.J., Leung K.M.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. N 17. P. 2295–2298.
- [5] *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolubov A.S., Skvortsov V.S., Merdanov M.K.* // Proc. of the 38th Eur. Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands, 2008. P. 484–487.
- [6] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 1. С. 73–80.
- [7] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К.* Патент РФ на изобретение 2360336 С1 МПК H01P 7/00. Широкополосная волноводная согласованная нагрузка. Оpubл. 27.06.2009. Бюл. № 18.
- [8] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мещанов В.П., Попова Н.Ф., Пономарев Д.В.* Патент РФ на изобретение 2601612 С1 МПК H01P 1/26. Волноводная согласованная нагрузка. Заявка: 2015120704/28 2012137649/07 от 01.06.2015. Оpubл. 10.11.2016. Бюл. № 31.
- [9] *Усанов Д.А., Мещанов В.П., Скрипаль А.В., Попова Н.Ф., Пономарев Д.В., Мерданов М.К.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 2. С. 216–220.
- [10] *Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В.* // УФН. 2011. Т. 181. № 8. С. 867–874.
- [11] *Zhu Z., Zhang X., Gu J., Singh R., Tian Z., Han J., Zhang W.* // IEEE Transact. Terahertz Sci. Technol. 2013. V. 3. N 6. P. 832–837.
- [12] *Nagatsuma T., Discourneau G., Renaud C.C.* // Nature Photon. 2016. V. 10. P. 371–379.
- [13] *Андреев В.Г., Ангелуц А.А., Вдовин В.А., Лукичев В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 4. С. 52–60.
- [14] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 112–117.
- [15] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 2. С. 65–70.
- [16] <http://npp-elmika.ru/info/index.php?id=151>