

Д.А. Усанов<sup>1</sup>, В.П. Мещанов<sup>2</sup>, А.В. Скрипаль<sup>1</sup>,  
Н.Ф. Попова<sup>2</sup>, Д.В. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского"

<sup>2</sup>ООО Научно-производственное предприятие «НИКА-СВЧ»

## Широкополосные согласованные нагрузки на фотонных кристаллах

*Приведены результаты теоретического и экспериментального обоснования возможности применения СВЧ фотонных кристаллов для создания широкополосных согласованных СВЧ-нагрузок. Показано, что оптимизация параметров металлодиэлектрической структуры с нанометровыми металлическими слоями позволяет выбрать диапазон частот, в котором необходимо реализовать требуемый коэффициент отражения.*

**Ключевые слова:** СВЧ фотонный кристалл, волноводные согласованные нагрузки

Авторами [1–4] отмечались общие закономерности для характеристики периодических структур различной природы: от твердотельных, в том числе полупроводниковых материалов, для которых характерна периодичность в расположении атомов, до, так называемых, СВЧ фотонных кристаллов, представляющих собой периодические структуры из различных диэлектриков, помещенных в линии передачи. К таким закономерностям, прежде всего, относится наличие чередующихся «разрешенных» и «запрещенных» зон или, в случае СВЧ фотонных кристаллов, полос пропускания и непропускания (запирания) для электромагнитных волн.

Известны работы, в которых рассматриваются различные области применения СВЧ фотонных кристаллов [5–9]. Целью настоящей работы было рассмотрение возможности их использования для создания согласованных СВЧ-нагрузок для трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов длин волн, обеспечивающих для этих диапазонов приемлемые для практики значения КСВН.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать частотные зависимости волноводного фотонного кристалла, представляющего собой короткозамкнутый с одной стороны отрезок прямоугольного волновода с размещенной в нем структурой из чередующихся металлических и диэлектрических слоев с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости.

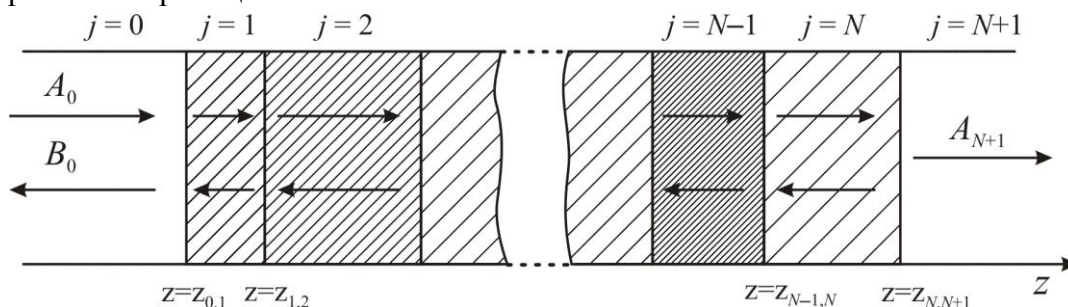


Рисунок 1.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на слоистую металлодиэлектрическую структуру (рис. 1) использовалась матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны  $\gamma_j$  и  $\gamma_{j+1}$  [10–13]:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix},$$

которая связывает коэффициенты  $A_j$ ,  $B_j$  и  $A_{j+1}$ ,  $B_{j+1}$ , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы  $z_{j,j+1}$ , соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \cdot \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты  $A_{N+1}$  и  $B_0$ , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (рис. 1), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом  $A_0$ , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix},$$

$$\text{где } \mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1})$$

матрица передачи слоистой структуры, состоящей из  $N$  слоев (рис. 1).

Коэффициенты отражения  $R = B_0/A_0$  и прохождения  $T = A_{N+1}/A_0$  электромагнитной волны, взаимодействующей со слоистой структурой, определяются через элементы матрицы передачи  $\mathbf{T}_N$  с помощью соотношений:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (1)$$

$$T = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (2)$$

Полученные соотношения были использованы для нахождения значений коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитной волны с

нагрузками на основе многослойных металлодиэлектрических структур, полностью заполняющих поперечное сечение волновода.

В ходе компьютерного моделирования была проанализирована возможность создания согласованных волноводных нагрузок в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Широкополосная волноводная согласованная нагрузка представляла собой фотонный кристалл, на основе многослойной металлодиэлектрической структуры. Количество слоёв, их толщины, диэлектрические проницаемости, электропроводности и порядок чередования слоев определялись в результате решения задачи по оптимизации, таким образом, чтобы величины коэффициентов отражения и прохождения были меньше заданных значений.

По данным численного эксперимента была изготовлена широкополосная волноводная согласованная нагрузка на основе многослойной металлодиэлектрической структуры (рис. 2). Нанометровые металлические слои (Ni-Cr-N) напылялись на поликорковые подложки. Дополнительно использовались фторопластовые слои, слои пенополистирола и ситалла. Слои плотно прижимались друг к другу механически и помещались в короткозамкнутый отрезок волновода.

В ходе экспериментальных исследований в диапазоне частот 8,15–12,05 ГГц были измерены частотные зависимости модуля коэффициента отражения (рис. 3) и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) (рис. 4) электромагнитной волны, взаимодействующей с 7-слойной структурой.

Измерения коэффициента отражения и коэффициента стоячей волны по напряжению проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA N5230A в диапазоне частот 8,15–12,05 ГГц. Толщины металлических пленок были измерены на атомно-силовом микроскопе Agilent 5600LS AFM.

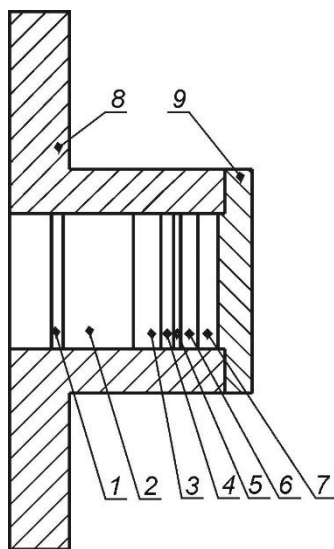


Рисунок 2.

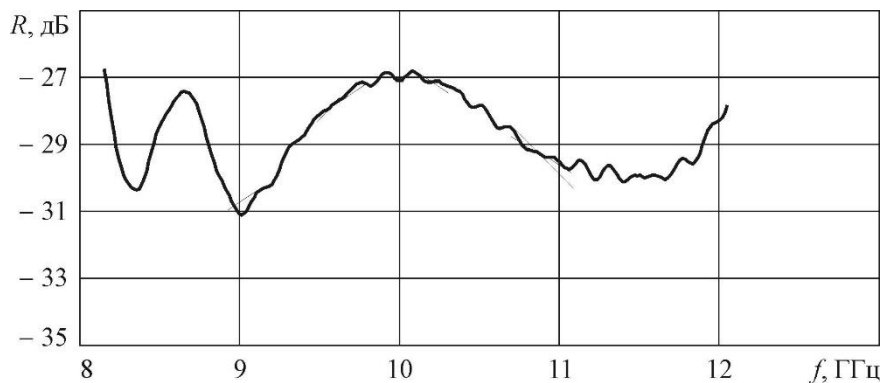


Рисунок 3.

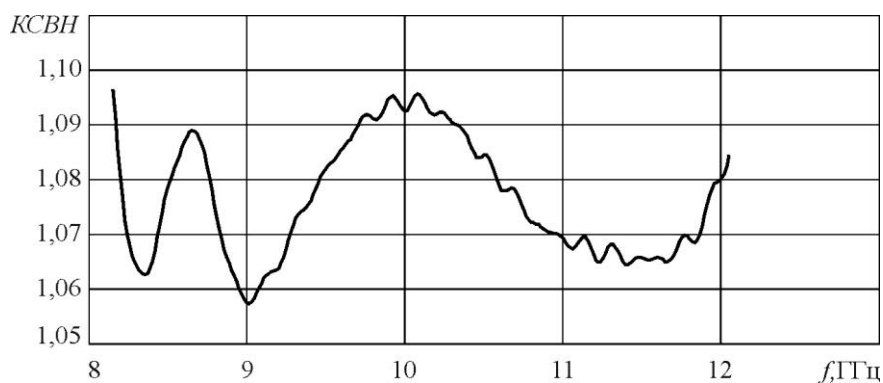


Рисунок 4.

Как следует из результатов эксперимента использование фотонных кристаллов на основе металлодиэлектрических структур с нанометровыми металлическими слоями для создания согласованной нагрузки позволяет обеспечить величину коэффициента стоячей волны по напряжению КСВН не более 1,1 в диапазоне 8,15–12,05 ГГц. Продольный размер устройства составлял 14 мм.

Нагрузки, предназначенные для использования в диапазоне частот 25,95—37,50 ГГц (размер волноводного канала 7,2×3,4 мм) имели КСВН < 1,15 (см. рис. 5). Продольный размер устройства составлял 6,5 мм.

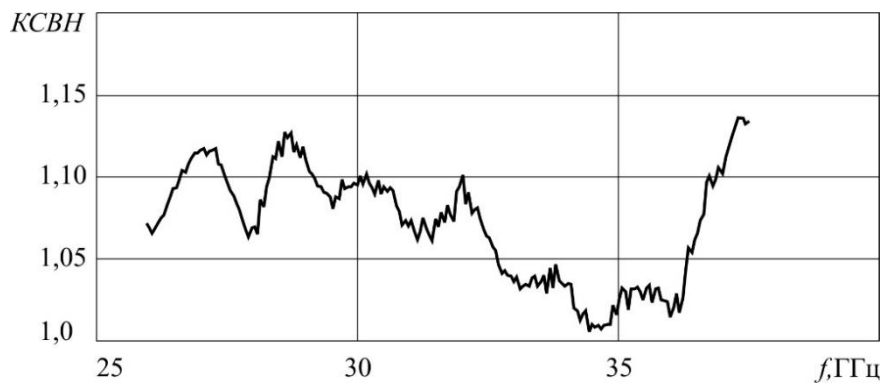


Рисунок 5.

Таким образом, показана теоретически и подтверждена экспериментально возможность создания широкополосных согласованных нагрузок на основе фотонных кристаллов, состоящих из чередующихся нанометровых металлических слоев с различными значениями толщины и электропроводности и диэлектрических слоев с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости. Оптимизация параметров металлodieлектрической структуры с нанометровыми металлическими слоями позволяет выбрать диапазон частот, в котором необходимо реализовать требуемый коэффициент отражения.

#### Библиографический список

1. Joannopoulos I.D., Villeneuve Pierre R., Fan S. Photonic crystals: putting a new twist on light // *Nature*. 1997. Vol.386. №13. P. 143–149.
2. Yablonovitch E., Gmitter T. J., and Leung K. M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // *The American Physical Society*. 1991. Vol. 67, №17. P. 2295–2298.
3. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966, 631с.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 342 с.
5. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // *Progress in Electromagnetics Research*, 2003. Vol. 41, P. 185–209.
6. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.
7. Gerard W. Burns, I. G. Thayne, J. M. Arnold “Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic,” in *Proc. of European Conference on Wireless Technology*, Amsterdam, Netherlands, 11–12th October 2004, P. 229-232.
8. Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // *Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004)*. –2004. – Vol. 2. – P. 1189–1192.
9. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // *Доклады Академии Наук*. 2005. Т. 403, № 3. С. 319–324.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // *ЖТФ*. 2006. Т. 76, вып. 5, с. 112–117.
11. Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения // *Известия вузов. Электроника*. 2006. №6. С. 27–35.
12. Usanov D.A., Skripal A.I.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kalinina N.V. Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum // *Proc. of 36rd European Microwave Conference*. Manchester, UK. 10–15th September 2006. P. 921–924.
13. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // *Известия вузов. Электроника*. 2007. №6. С. 25–32.