

С. Л. Скрипка

## Планарные фотонные структуры сверхвысокочастотного диапазона

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А. Д. Федоровским)

*Наведено результати експериментального дослідження та електродинамічного аналізу хвильових фотонних структур у діапазоні частот 78–130 ГГц. Фотонна заборонена зона хвильової структури створювалась різними конфігураціями періодичної модуляції її хвильового опору. Результати досліджень показали можливість створення фотонних фільтрів різного призначення в міліметровому та субміліметровому діапазоні довжин хвилі.*

В настоящее время фотонно-кристаллические материалы, т. е. материалы со структурно упорядоченными неоднородностями электродинамических параметров [1], широко применяются в оптоэлектронике и лазерной технике [2]. Одновременно проводятся теоретические и экспериментальные исследования фотонных структур в сверхвысокочастотном диапазоне частот [3]. При этом особенно актуальным направлением является изучение планарных фотонных структур с повышенной степенью интеграции в субмиллиметровой части спектра электромагнитных волн.

Обычно фотонные структуры создаются периодической модуляцией диэлектрической проницаемости материала, т. е. периодическим изменением волнового сопротивления волноведущей структуры. Как было показано в [3–5], возможно создание 2D структур с фотонной запрещенной зоной путем непосредственной модуляции волнового сопротивления планарного двусвязного волновода, т. е. путем формирования щелей на его металлизированных поверхностях. Такой подход к формированию фотонной структуры является более простым и предпочтительным, чем модуляция диэлектрической проницаемости, поскольку не требует сложного и дорогого технологического процесса изготовления.

В настоящей работе приведены результаты электродинамического анализа и экспериментального исследования структур с фотонной запрещенной зоной разного типа, изготовленных на основе бездисперсионного планарного двусвязного волновода [4, 5].

**Электродинамический анализ.** Наиболее эффективным современным методом электродинамического исследования структур со сложными граничными условиями является метод конечных разностей во временной области (Finite-difference time-domain (FDTD)) [6, 7], поскольку он дает возможность решения полной системы уравнений Максвелла. Суть метода состоит в том, что расчетный объем  $G = X \times Y \times Z$  разбивается на элементарные ячейки размером  $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ , а время делится на дискретные интервалы  $\Delta t$  [6]. В каждой элементарной ячейке в момент  $T = n\Delta t$  при  $n = 0$ , где  $n$  — количество моментов времени, должны быть заданы начальные и граничные условия, определяющие рассчитываемую структуру. Система уравнений Максвелла раскладывается по конечно-разностной схеме и преобразуется в систему алгебраических уравнений. Далее, чтобы получить картину поля в момент времени  $T = (n + 1)\Delta t$ , в каждой элементарной ячейке рассчитывается полная система алгебраических уравнений Максвелла на основе данных из этой ячейки

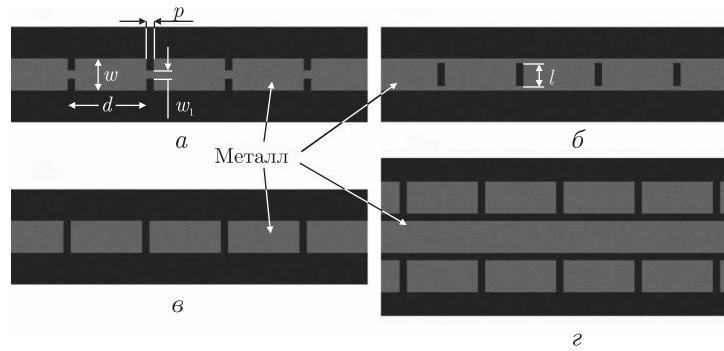


Рис. 1. Схематическое изображение четырех исследуемых фотонных структур, где  $d$  — период структуры,  $p$  — длина щели,  $w$  — ширина волновода,  $l$  — ширина щели ( $б$ ),  $w_1$  — ширина волновода в области сужения ( $а$ )

и ее близлежащих соседей, полученных при расчете предыдущего момента времени. Многократное повторение просчета позволяет получить полную картину электромагнитного поля в каждой точке расчетного объема в произвольный момент времени.

Параметры FDTD метода были выбраны следующим образом:

для предотвращения переотражений электромагнитных волн от границ расчетного объема, т. е. для имитации безэховой камеры, на этих границах задавались специальные граничные условия Perfectly Matched Layers (PML) [7];

для учета потерь на металлических поверхностях применялись граничные условия Леонтовича [8], а для учета потерь в диэлектриках — математическая модель полярных диэлектриков [9];

для устранения ошибок на границах сложных структур применялся метод уточнения граничных условий Perfect Boundary Approximation (PBA) [10].

**Эксперимент.** Измерения проводились с помощью анализатора цепей R2403E, при этом для корректного сопряжения стандартного волноводного выхода генератора и планарного двухсвязного волновода использовался специальный Н-переход со сверхмалым коэффициентом отражения, коэффициент стоячей волны которого  $K_{СТ} < 1,02$ . В процессе экспериментального исследования были выбраны следующие параметры:

измерения проводились в частотном диапазоне 78–130 ГГц;

в качестве материала, на основе которого изготавливались исследуемые образцы, использован Duroid RT5880: высота  $h = 125$  мкм, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2,2$ , тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta = 0,0011$ .

**Структуры с фотонной запрещенной зоной.** Исследуемые структуры показаны на рис. 1. (Далее по тексту рассматриваемые структуры обозначены  $а$ ,  $б$ ,  $в$ ,  $г$  соответственно с изображенными на рис. 1.) В структуре  $а$  модуляция волнового сопротивления создана путем периодического изменения ширины  $w$  волновода. В структурах  $а$  и  $б$  изменение волнового сопротивления создано путем формирования щелей с периодом  $d$  и длиной  $p$  на металлизированных поверхностях волновода. Нужно отметить, что в случае структуры  $в$  щель имеет ширину  $l < w$ , а в случае структуры  $б$  щель полностью размыкает проводящие металлические полоски. Конфигурация структуры  $г$  построена на основе планарного двухсвязного волновода, окруженного двумя фотонными структурами.

Исследуемые фотонные структуры обладают следующими геометрическими параметрами:  $d = \lambda$ ,  $p = h$ ,  $w = \lambda/5$ ,  $w_1 = w/4$ ,  $l = w - w_1$ , где  $\lambda$  — длина волны, соответствующая частоте 100 ГГц.

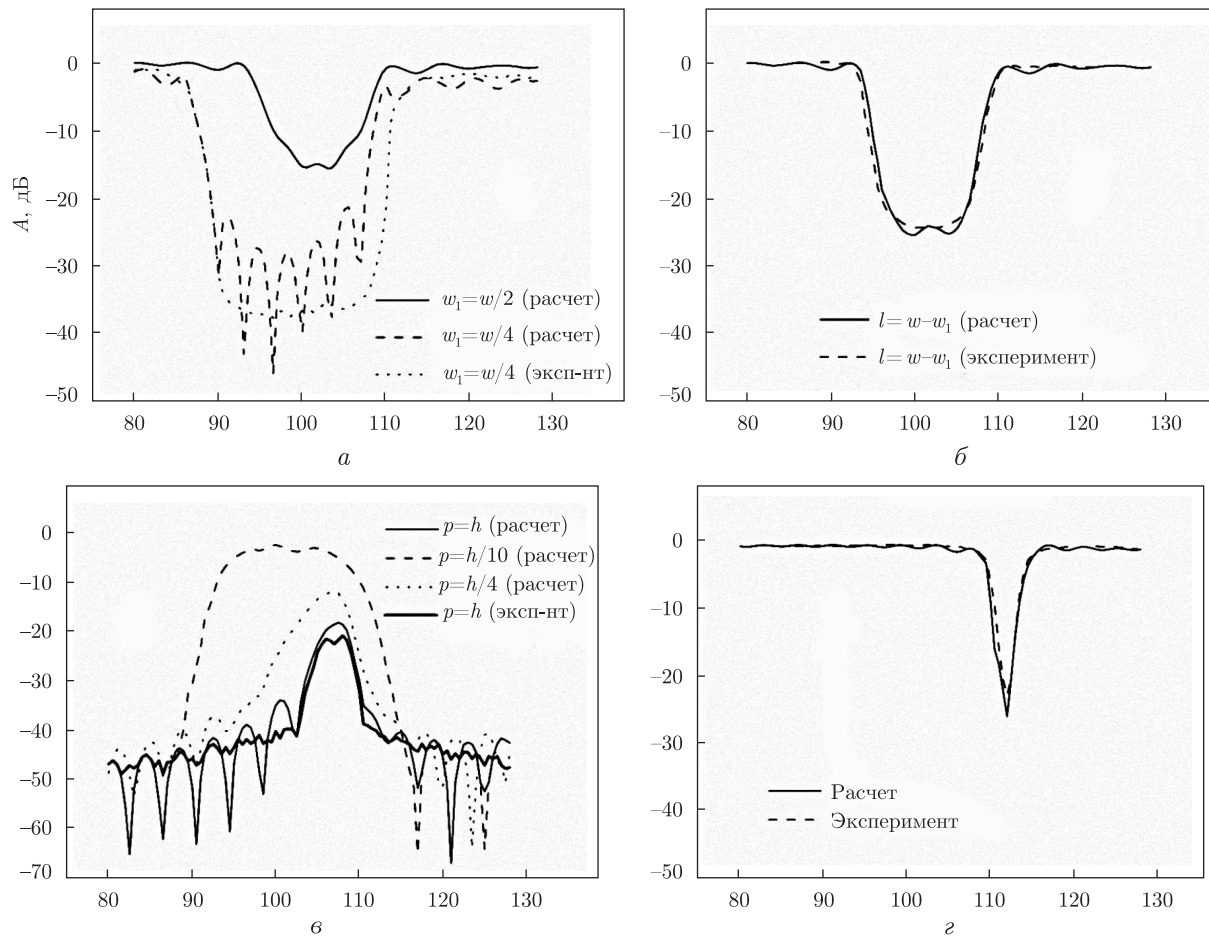


Рис. 2. Рассчитанные и полученные экспериментально зависимости амплитуды сигнала, прошедшего через фотонные структуры, от частоты и геометрических параметров

Рассчитанные и полученные экспериментально зависимости амплитуды сигнала, прошедшего через фотонные структуры, изображенные на рис. 1, от частоты и геометрических параметров, приведены на рис. 2. Согласно полученным результатам, структура  $a$  обладает широкой полосой загораживания. Как видно из рис. 2,  $a$ , ширина полосы  $\Delta\omega$  существенным образом зависит от величины параметра  $w_1$ . Дальнейшие исследования показали, что  $\Delta\omega \sim 1/\sqrt{w_1/w}$ , т. е. ширина полосы загораживания претерпевает значительные изменения при  $w_1 \ll w$ . В свою очередь, ширина полосы зависит от величины параметра  $p$  как  $\Delta\omega \sim \sqrt{p/d}$ . Величина загораживания  $L$  обратно пропорциональна величине параметра  $w_1$  и прямо пропорциональна величине параметра  $p$ . Исследования также показали, что количество периодов фотонной структуры не влияет на ширину полосы, а влияет только на крутизну на краях полосы загораживания.

Структура  $b$  по своим электродинамическим характеристикам, схожа со структурой  $a$  (см. рис. 2,  $b$ ). Однако при условии равенства геометрических параметров этих двух структур и  $l = w - w_1$  первая обладает менее широкой зоной загораживания.

Структура  $c$  является набором связанных резонаторов, коэффициент связи которых регулируется величиной параметра  $p$  (см. рис. 2,  $c$ ). При увеличении параметра  $p$ , т. е. при

уменьшении коэффициента связи данная структура обладает довольно узкими пиками пропускания и широкими полосами заграждения. С другой стороны, с увеличением параметра  $p$  возрастает величина заграждения  $L$  в пике пропускания. При уменьшении параметра  $p$  добротность каждого резонатора снижается, что приводит к уширению пиков пропускания, и при условии  $p < h/8$  ширина  $\Delta\omega$  пиков пропускания будет равна ширине пиков заграждения. Необходимо отметить, что при условии  $h, p < \lambda/8$  электродинамические параметры структуры  $\epsilon$  не зависят от частоты. Таким образом, варьируя параметры этой структуры, можно получить как полосно-пропускающий, так и полосно-заграждающий фильтры.

Структура  $g$  обладает значительно более узкими пиками заграждения, чем структура  $a$  (см. рис. 2,  $g$ ). В данном случае величина заграждения  $L$  возрастает при увеличении количества периодов структуры и при уменьшении расстояния между центральным планарным волноводом и фотонными элементами. Однако дальнейшие исследования показали, что при увеличении параметра  $p$  не происходит уширение пика заграждения, как в случае, отображенном на рис. 2,  $a$ , а отмечается смещение резонансной частоты пика в направлении высоких частот. В свою очередь, при уменьшении параметра  $p$  пик заграждения смещается в направлении низких частот.

Как видно из рис. 2, расхождение между рассчитанными экспериментально измеренными кривыми находится в пределах  $\pm 10\%$ .

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о возможности создания фотонных структур различного назначения на основе бездисперсионного планарного двусвязного волновода. Вследствие хорошей электродинамической масштабируемости планарного волновода, такие структуры могут быть построены и использованы не только в миллиметровом, но и в субмиллиметровом диапазонах длин волн.

1. *Yablonovitch E.* Photonic band-gap structures // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 1993. – **10**. – P. 283–295.
2. *Johnson S. G., Joannopoulos J. D.* Photonic crystals: the road from theory to practice. – Dordrecht: Kluwer, 2002. – 623 p.
3. *Danilov V. V., Skripka S. L., Nechyporuk O. U.* Planar waveguides and resonators of mm- and submm bands // *Proc. of the Sixth Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Wave and Workshop on Terahertz Technologies, Kharkov, June 25–30, 2007.* – Vol. 1. – P. 234–236.
4. *Wheeler H. A.* Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane // *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* – 1977. – **25**. – P. 631–647.
5. *Bahl I. J., Ramesh G.* Simple and accurate formulas for microstrip with finite strip thickness // *Proc. IEEE.* – 1977. – **65**. – P. 1611–1612.
6. *Yee K. S.* Numerical solutions of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* – 1966. – **14**, No 3. – P. 302–307.
7. *Berenger J. P.* A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // *J. Comp. Phys.* – 1994. – **114**, No 2. – P. 185–200.
8. *Beggs J. H., Yee K. S.* Finite-difference time-domain implementation of surface impedance boundary conditions // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* – 1992. – **40**, No 1. – P. 49–56.
9. *Luebbers R.* A frequency-dependend finite-difference time-domain formulation for dispersive materials // *IEEE Trans. Electromagn. Compatib.* – 1990. – **32**, No 3. – P. 222–227.
10. *Benkler S., Chavannes N., Kuster N.* A new 3-D conformal PEC FDTD scheme with user-defined geometric precision and derived stability criterion // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* – 2006. – **54**, No 6. – P. 1843–1849.

Київський національний університет  
ім. Тараса Шевченка

Поступило в редакцію 28.04.2009

**S. L. Skripka**

## **Plane photonic structures in the SHF range**

*The experimental and computation results of studies of planar waveguiding photonic structures in the frequency range 78–130 GHz are presented. The photonic band-gap of waveguides was formed by different configurations of a waveguide impedance modulation. The results have displayed the possibility of creation of photonic filters for different purposes in the millimeter and submillimeter wavelengths.*