

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИБОРАХ, ЭЛЕМЕНТАХ И СИСТЕМАХ НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.396

А. В. ГРИБОВСКИЙ<sup>1</sup>, И. К. КУЗЬМИЧЕВ<sup>2</sup>

PACS number: 41.20.–q

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: grib@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: kuzmichev.igr@i.ua

## РЕЗОНАТОР ФАБРИ–ПЕРО, ОБРАЗОВАННЫЙ ДВУМЯ ЭКРАНАМИ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

*Цель работы: исследование электродинамических свойств резонатора Фабри–Перо, образованного двумя параллельными идеально проводящими экранами конечной толщины с прямоугольными отверстиями, при его возбуждении плоской волной.*

*Методы исследования: операторный метод решения задач дифракции, основанный на методе частичных областей и методе обобщенных матриц рассеяния.*

*Результаты работы: В результате проведенного численного моделирования показано, что модуль коэффициента отражения плоской волны от резонатора равен нулю на фиксированной длине волны, являющейся запредельной для отрезков прямоугольных волноводов, выполненных в обоих экранах. При этом наблюдается сильная локализация электромагнитного поля в объеме резонатора. При исследовании частотно-селективных свойств каждого из экранов в отдельности установлено, что в них отсутствуют резонансы полного прохождения электромагнитной волны на частотах ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов. Установлено, что при замене одного из зеркал резонатора Фабри–Перо сплошной металлической плоскостью амплитуда плоской волны в резонаторе может возрасти почти на порядок относительно амплитуды возбуждающего поля.*

*Заключение: Уникальные электродинамические свойства рассмотренной структуры могут найти применение в устройствах для усиления или генерации электромагнитных волн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также для измерения электрофизических свойств композиционных материалов с большими потерями.*

*Ключевые слова:* двумерно-периодический экран, прямоугольный волновод, резонатор Фабри–Перо, коэффициент отражения, запредельный волновод

### 1. Введение

Двухслойные и многослойные структуры широко применяются в различных областях техники. В качестве элементов таких структур используются, например, металлические экраны с отверстиями различной формы [1, 2]. В рассеянном поле таких экранов на определенных частотах могут наблюдаться резонансы полного прохождения и полного отражения электромагнитных волн. Многослойные структуры обладают рядом уни-

кальных свойств, которые успешно используются при конструировании различных объектов. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах такие структуры находят применение в качестве компонентов частотных и поляризационных фильтров, волноводов, а также образующих элементов квазиоптических резонансных систем [3, 4]. Они могут быть использованы также для формирования направленных свойств антенн. В работе [5] проанализированы поляризационные и частотно-селективные свойства двойного экрана конечной толщины с коаксиально-секторными

отверстиями. Найдены и объяснены резонансы полного и частичного прохождения электромагнитных волн при различных расстояниях между экранами и на разных частотах. В работе [6] исследована структура, состоящая из конечного числа идентичных двумерно-периодических экранов конечной толщины с волноводными каналами прямоугольной формы. Как оказалось, на определенных частотах в такой квазипериодической структуре могут существовать зоны “запирания”, когда собственная электромагнитная волна не распространяется. Интерес к многослойным структурам вызван еще и тем, что в последнее время активно проводятся исследования, направленные на создание искусственных сред (метаматериалов), обладающих оптической активностью. В работе [7] показано, что структура, состоящая из двух экранов с круглыми запердельными отверстиями, в случае определенной пространственной симметрии ее периодической ячейки может являться вращателем плоскости поляризации падающей на нее волны. А поскольку подобные структуры, как было сказано выше, находят применение в различных приборах и устройствах, представляет

практический интерес рассмотреть их как резонаторы Фабри–Перо. Таким образом, целью настоящей работы является исследование электродинамических свойств резонатора Фабри–Перо, образованного двумя параллельными идеально проводящими экранами конечной толщины с прямоугольными отверстиями. Толщина экранов и отверстия в них имеют различные геометрические параметры.

## 2. Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим структуру, состоящую из двух бесконечных параллельных идеально проводящих двумерно-периодических экранов конечной толщины  $h_1$  и  $h_2$  с прямоугольными отверстиями. Расстояние между экранами равно  $H$  и выбрано из условия  $H \geq \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. На рис. 1 изображена исследуемая структура, которая представляет собой резонатор Фабри–Перо, образованный двумя параллельными экранами с прямоугольными отверстиями, центры базовых ячеек которых расположены в узлах треугольной сетки. Отверстия

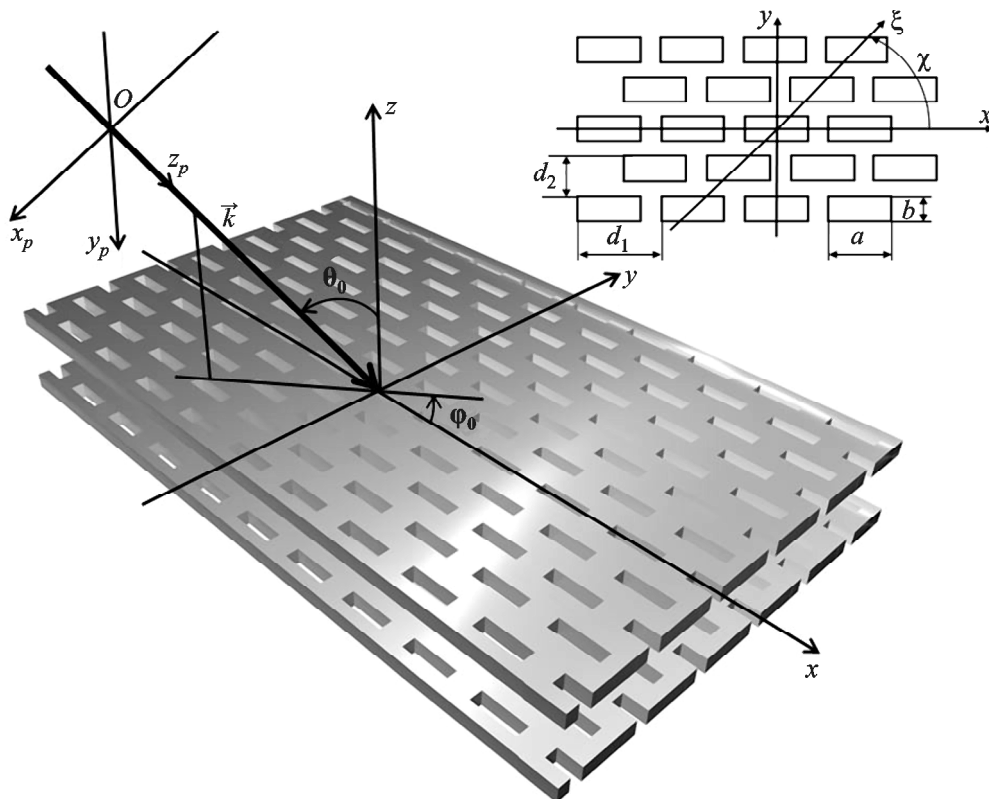


Рис. 1. Резонатор Фабри–Перо с прямоугольными отверстиями в зеркалах

в экранах мы рассматриваем как отрезки прямоугольных волноводов, имеющих поперечные сечения  $a_1 \times b_1$  и  $a_2 \times b_2$ . Размеры поперечных сечений выбираются из условия распространения в них только основной волноводной волны. Индексом “1” обозначены параметры волноводов, относящиеся к верхнему экрану, а индексом “2” – к нижнему экрану. Центры базовых ячеек в обоих экранах располагаются с одинаковыми периодами  $d_1$  (вдоль оси  $x$ ) и  $d_2$  (вдоль оси  $y$ ) (см. рис. 1). При этом значения периодов выбираются из условия распространения в свободном пространстве только одной пространственной гармоники.

Пусть на рассматриваемую структуру из полупространства  $z > 0$  нормально падает плоская линейно поляризованная электромагнитная волна единичной амплитуды. Поперечную компоненту электрического поля падающей волны, нормированную на площадь базовых ячеек экранов, представим в виде

$$\vec{E}_i^i = \exp(-ikz) \times \vec{\psi}, \quad (1)$$

где  $\vec{\psi} = -\frac{1}{\sqrt{S}} \vec{e}_y$ ,  $S = d_1 \times d_2$  – площадь базовых ячеек экранов,  $\vec{e}_y$  – единичный орт;  $k = 2\pi/\lambda$ . Направление поляризации в падающей волне выбрано вдоль оси  $Oy$  из условия наиболее эффективного возбуждения основной волны в прямоугольных волноводных каналах экранов.

Для численного исследования электродинамических характеристик данной структуры воспользуемся методом обобщенных матриц рассеяния [8].

Рассмотрим сечения базовой ячейки резонатора в плоскости  $zy$ , (см. рис. 2).

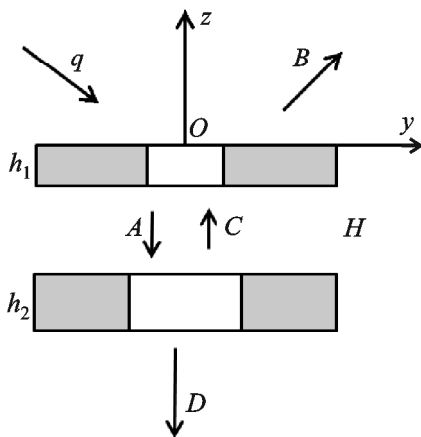


Рис. 2. Сечение базовой ячейки

Здесь  $q$  – амплитуда падающей волны;  $B$  – вектор амплитуд пространственных гармоник отраженного поля;  $A$ ,  $C$  – амплитуды пространственных гармоник, распространяющихся между экранами;  $D$  – вектор амплитуд пространственных гармоник прошедшего поля.

С учетом обозначений, принятых на рис. 2, запишем систему операторных уравнений относительно неизвестных амплитуд пространственных гармоник:

$$\begin{cases} B = R_1 q + T_1 C, \\ A = T_1 q + R_1 C, \\ C = e R_2 e A, \\ D = T_2 e A. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (2) имеет вид:

$$\begin{aligned} D &= T_2 e P^{-1} T_1 q, \\ A &= P_1^{-1} T_1 q, \end{aligned} \quad (3)$$

$$C = e R_2 e P^{-1} T_1 q,$$

$$B = (R_1 + T_1 e R_2 e P^{-1} T_1) q.$$

где  $P = (I - R_1 e R_2 e)$ ,  $I$  – единичный оператор;  $R_{1,2}$ ,  $T_{1,2}$  – операторы отражения и прохождения плоских электромагнитных волн первого и второго экранов соответственно;  $e$  – оператор, учитывающий фазовый набег пространственных гармоник между экранами на расстоянии  $H$ . Операторы отражения и прохождения представляют собой бесконечные матрицы рассеяния, элементами которых являются амплитуды распространяющихся и не распространяющихся пространственных гармоник. Алгоритм расчета обобщенных матриц рассеяния описан в работе [9].

### 3. Численные результаты

Исследования электродинамических свойств резонатора Фабри–Перо, образованного двумя параллельными идеально проводящими экранами конечной толщины с прямоугольными отверстиями (см. рис. 1), проводились при нормальном падении на верхний экран (зеркало) плоской линейно поляризованной волны единичной амплитуды. Вектор электрического поля в падающей волне параллелен оси  $y$ . Центры базовых ячеек экранов,

образующих резонатор Фабри–Перо, расположены в узлах прямоугольной сетки с равными периодами  $d_1 = d_2 = d$ . Геометрические параметры структуры и частотный диапазон выбирались путем их численной оптимизации. Ее целью являлось нахождение таких режимов работы двойного экрана, представляющего собой исследуемый резонатор, при которых наблюдались бы резонансы полного прохождения и полного отражения плоской электромагнитной волны, нормально падающей на резонатор. В результате проведенной численной оптимизации были выбраны следующие значения геометрических параметров:  $d = 1.5$  мм,  $a_1 = 1$  мм,  $b_1 = 0.3$  мм,  $h_1 = 0.92$  мм,  $a_2 = 1.1$  мм,  $b_2 = 0.3$  мм,  $h_2 = 2.2$  мм,  $H = 1.996$  мм. При таких параметрах частота отсечки прямоугольных волноводов, образующих верхний экран, равна  $f_{cut}^{(1)} = 150$  ГГц ( $\lambda_{cut}^{(1)} = 2$  мм), а частота отсечки прямоугольных волноводов, входящих в состав нижнего экрана, составляет  $f_{cut}^{(2)} = 136.364$  ГГц ( $\lambda_{cut}^{(2)} = 2.2$  мм).

На рис. 3 представлена частотная зависимость модуля коэффициента отражения  $|R|$  плоской волны при ее падении на исследуемый резонатор. Как видно, модуль коэффициента отражения для резонатора Фабри–Перо, образованного двумя параллельными экранами с прямоугольными отверстиями, равен нулю на частоте  $f = 127.94$  ГГц ( $\lambda = 2.345$  мм), которая ниже частот отсечки волноводов первого и второго экранов. Или, другими словами, длина волны рассматриваемого резонанса больше критических длин волн прямоугольных волноводов первого и второго экранов, т. е. она является закритической.

В этом случае происходит сильная локализация электромагнитного поля в объеме резонато-

ра, и его амплитуда возрастает и становится в несколько раз больше амплитуды падающего поля. На рис. 4 показаны частотные зависимости модулей амплитуд пространственных гармоник  $|C|$  и  $|A|$ , распространяющихся между экранами соответственно в положительном и отрицательном направлениях вдоль оси  $z$  (см. рис. 2). Численные исследования показали, что на частоте рассматриваемого резонанса амплитуды электромагнитных волн, распространяющихся между экранами в противоположных направлениях, равны между собой, т. е.  $|A| = |C|$ , и в 4.5 раза превышают амплитуду падающего поля. Таким образом, наблюдается возбуждение плоской волной резонатора Фабри–Перо через запредельные прямоугольные отверстия. Длина волны на частоте резонанса, как было показано выше, равна  $\lambda = 2.345$  мм и незначительно превышает расстояние между экранами  $H$ , поскольку электромагнитное поле проникает в область отверстий и имеет место увеличение резонансной длины волны в рассматриваемом резонаторе.

Исследование частотно-селективных свойств каждого из экранов в отдельности показало, что в этом случае отсутствуют резонансы полного прохождения электромагнитной волны на частотах ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов (см. рис. 5). Полное или частичное прохождение электромагнитного поля наблюдается на частотах, при которых по длине волноводных каналов первого или второго экранов укладывается приблизительно целое число волноводных полуволн.

Степень локализации электромагнитного поля в резонаторе может быть значительно увеличена, если один из экранов, в данном случае

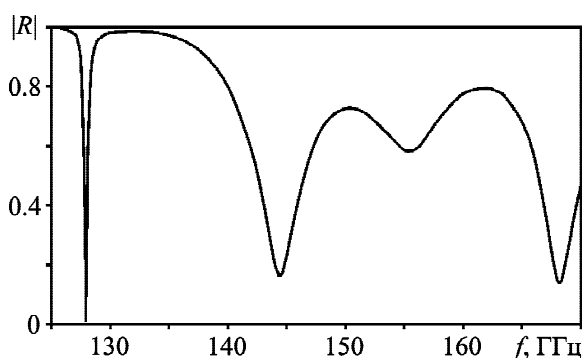


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения плоской волны от частоты

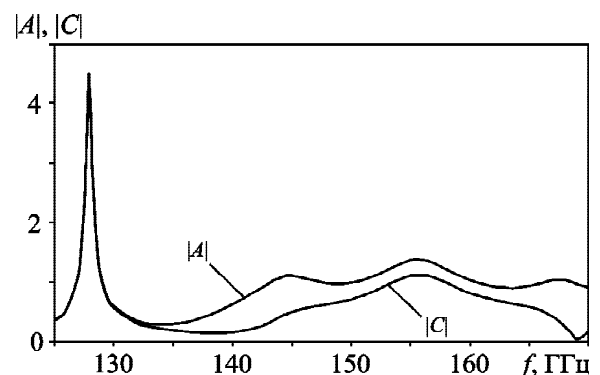


Рис. 4. Зависимость модулей амплитуд плоской волны, распространяющейся между экранами, от частоты

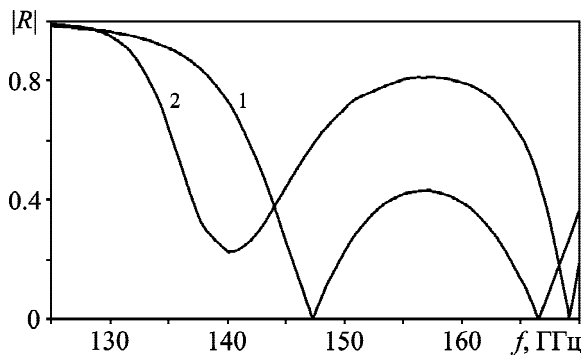


Рис. 5. Зависимости модулей коэффициентов отражения от частоты для первого (1) и второго (2) экранов

второй, заменить металлической плоскостью. На рис. 6 представлены зависимости модулей амплитуд пространственных гармоник  $|A|$  и  $|C|$ , распространяющихся в объеме между экраном с прямоугольными отверстиями и металлической плоскостью соответственно в положительном и отрицательном направлениях вдоль оси  $z$ , при изменении расстояния между экранами на резонансной частоте  $f = 127.94$  ГГц (см. рис. 3). Видно, что амплитуда плоской волны в резонаторе может почти на порядок превышать амплитуду возбуждающего поля. Из рисунка следует также, что увеличение амплитуды плоской волны между экранами имеет место при  $H = 2.217$  мм. Следующий максимум наблюдается при  $H = 3.390$  мм. Таким образом, расстояние между соседними максимумами равно половине длины волны в свободном пространстве на рассматриваемой частоте. Расстояние между экранами, соответствующее первому максимуму, при замене второго экрана металличе-

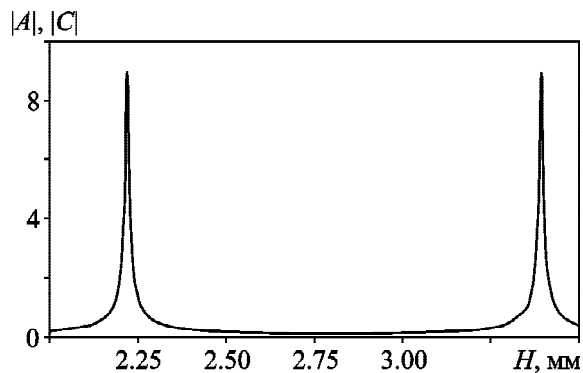


Рис. 6. Зависимость модулей амплитуд плоской волны в резонаторе от расстояния между экранами на частоте  $f = 127.94$  ГГц (второй экран – металлическая плоскость)

ской плоскостью увеличилось на 0.221 мм по сравнению со случаем, когда рассматривались два экрана с отверстиями ( $H = 1.996$  мм). Это подтверждает сделанное выше предположение о том, что резонансное расстояние между двумя экранами не равно целому числу полуволн по причине проникновения электромагнитного поля в область отверстий. При этом модуль коэффициента отражения плоской волны равен единице во всем диапазоне изменения расстояний между экраном и металлической плоскостью, поскольку можно показать, что среднее за период значение плотности потока энергии электромагнитного поля в резонаторе при  $|A| = |C|$  равно нулю и накопления энергии в исследуемой структуре не происходит.

#### 4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных численных исследований электродинамических свойств резонатора Фабри–Перо, состоящего из двух параллельных идеально проводящих экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями, были получены следующие важные результаты. В такой структуре при ее возбуждении плоской линейно поляризованной электромагнитной волной наблюдается резонанс полного прохождения на длине волны  $\lambda = 2.345$  мм, являющейся предельной для отрезков прямоугольных волноводов, выполненных в обоих экранах. При этом наблюдается сильная локализация электромагнитного поля в объеме резонатора. Исследование частотно-селективных свойств каждого из экранов в отдельности показало, что в них отсутствуют резонансы полного прохождения электромагнитной волны на частотах, ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов. При замене второго экрана со стороны падающей электромагнитной волны металлической плоскостью амплитуда плоской волны в резонаторе может почти на порядок превысить амплитуду возбуждающего поля. С учетом уникальных электродинамических свойств рассмотренная структура может применяться для усиления или генерации электромагнитных волн в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также для измерения электрофизических свойств материалов с большими потерями, например, композиционных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Euler M. and Fusco V. Frequency Selective Surface Using Nested Split Ring Slot Elements as a Lens With Mechanically Reconfigurable Beam Steering Capability // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2010. – Vol. 58, No. 10. – P. 3417–3421. DOI: 10.1109/TAP.2010.2055814
2. Azemi S. N., Ghorbani K., and Rowe W. S. T. 3D Frequency Selective Surfaces // *Prog. Electromagn. Res. C.* – 2012. – Vol. 29. – P. 191–203. DOI: 10.2528/PIREC12033006
3. Банков С. Е., Дупленкова М. Д., Фролова Е. В. Собственные колебания резонатора на основе электромагнитного кристалла // *Журнал радиоэлектроники.* – 2013. – № 7. – С. 1–27.
4. Ziran Wu, Wei-Ren Ng, Michael E. Gehm, and Hao Xin Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19, No. 5. – P. 3962–3972. DOI: 10.1364/OE.19.003962
5. Антоненко Ю. В., Грибовский А. В. Поляризационные и частотно-селективные характеристики двойного экрана конечной толщины с коаксиально-секторными отверстиями // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 276–281.
6. Грибовский А. В., Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Дифракция электромагнитных волн на многослойной структуре из бесконечных металлических экранов с прямоугольными отверстиями // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2000. – Т. 5, № 2. – С. 166–170.
7. Перов А. О., Кириленко А. А., Деркач В. Н., Салогуб А. Н. Система двух экранов с круглыми заперделными отверстиями как квазиоптический поляризатор // *Радиофизика и электроника.* – 2015. – Т. 6(20), № 3. – С. 3–10.
8. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев: Наукова думка, 1984. – 239 с.
9. Грибовский А. В., Просвирнин С. Л., Резник И. И. Отражательная фазированная антенная решетка из прямоугольных волноводов конечной глубины // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 52–60.
10. Screen of Finite Thickness with Coaxial-Sector Aperture. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 17, no. 3, pp. 276–281 (in Russian).
11. GRIBOVSKY, A. V., LYTVYNENKO, L. M. and PROSVIRNIN, S. L., 2000. Diffraction of Electromagnetic Waves on a Multi-Layer Structure of Metal Screens with Rectangular Holes. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 5, no. 2, pp. 166–170 (in Russian).
12. PEROV, A. O., KIRILENKO, A. A., DERKACH, V. N. and SALOGUB, A. N., 2015. System of two screens with the circular beyond the limits openings as the quasi-optical polarizer. *Radiofizika i Elektronika.* vol. 6(20), no. 3, pp. 3–10 (in Russian).
13. LITVINENKO, L. N. and PROSVIRNIN, S. L., 1984. *Spectral operators of dispersion in the tasks of diffraction of waves on flat screens.* Kyiv: Naukova dumka (in Russian).
14. GRIBOVSKY, A. V., PROSVIRNIN, S. L. and REZNIK I. I., 1997. Reflecting Phased Array Antenna Consisting of Rectangular Waveguides of Finite Depth. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 2, no. 1, pp. 52–60 (in Russian).

A. V. Gribovsky<sup>1</sup> and I. K. Kuz'michev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

#### FABRY–PEROT RESONATOR FORMED BY TWO SCREENS WITH RECTANGULAR HOLES

*Purpose:* studies of electrodynamic properties of Fabry–Perot resonator formed by two parallel perfectly conducting screens of finite thickness with rectangular holes while its exciting by a plane wave.

*Design:* operator method of diffraction problems solving based on the method of partial areas and the method of generalized scattering matrixes.

*Findings:* The numerical modeling showed that module of the coefficient of plane wave reflection from the resonator is equal to zero at a fixed wavelength being prohibitive for segments of rectangular waveguides made in both screens. Here, a strong localization of electromagnetic field in the resonator volume is observed. Studying the frequency-selective properties of each screen individually it has been determined that there are no resonances of electromagnetic wave total transmission below the cut-off frequency of rectangular waveguides. It is found that with replacing one of the Fabry–Perot resonator mirrors by a solid metal plane, the amplitude of a plane wave in the resonator can increase by almost an order of magnitude as against the exciting field amplitude.

*Conclusions:* Unique electrodynamic properties of the considered structure can find application in devices for amplifying or generating electromagnetic waves in millimeter and submillimeter bands, as well as in measuring electrical properties of composite materials with large losses.

*Key words:* two-dimensional periodic screen, rectangular waveguide, Fabry–Perot resonator, reflection coefficient, ultra-boundary waveguide

## REFERENCES

1. EULER, M. and FUSCO, V., 2010. Frequency Selective Surface Using Nested Split Ring Slot Elements as a Lens with Mechanically Reconfigurable Beam Steering Capability. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 58, no. 10, pp. 3417–3421. DOI: 10.1109/TAP.2010.2055814
2. AZEMI, S. N., GHORBANI, K. and ROWE, W. S. T., 2012. 3D Frequency Selective Surfaces. *Prog. Electromagn. Res. C.* vol. 29, pp. 191–203. DOI: 10.2528/PIREC12033006
3. BANKOV, S. E., DUPLENKOVA, M. D. and FROLOVA, E. V., 2013. Eigenmodes of resonator on the basis of an electromagnetic crystal. *Zhurnal Radioelektroniki.* no. 7, pp. 1–27 (in Russian).
4. ZIRAN WU, WEI-REN NG, MICHAEL E. GEHM and HAO XIN., 2011. Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping. *Opt. Express.* vol. 19, no. 5, pp. 3962–3972. DOI: 10.1364/OE.19.003962
5. ANTONENKO, J. V. and GRIBOVSKY, A. V., 2012. Polarization and Frequency-Selective Properties of a Double

О. В. Грибовський<sup>1</sup>, І. К. Кузьмичев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України,  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

#### РЕЗОНАТОР ФАБРІ–ПЕРО, УТВОРЕНИЙ ДВОМА ЕКРАНАМИ З ПРЯМОКУТНИМИ ОТВОРАМИ

*Мета роботи:* дослідження електродинамічних властивостей резонатора Фабрі–Перо, утвореного двома паралельними ідеально провідними екранами скінченної товщини з прямокутними отворами, при його збудженні плоскою хвилею.

*Методи дослідження:* операторний метод розв'язку задач дифракції, що ґрунтується на методі часткових областей і методі узагальнених матриць розсіювання.

*Результати роботи:* В результаті виконаного числового моделювання показано, що модуль коефіцієнта відбиття плоскої хвилі від резонатора дорівнює нулю на фіксованій довжині хвилі, котра є позамежною для відрізків прямокутних

хвилеводів, виконаних в обох екранах. При цьому спостерігається потужна локалізація електромагнітного поля в об'ємі резонатора. У дослідженні частотно-селективних властивостей кожного з екранів окремо встановлено, що в них відсутні резонанси повного проходження електромагнітної хвилі на частотах нижче частоти відсічення прямокутних хвилеводів. Встановлено, що з заміною одного з дзеркал резонатора Фабрі–Перо суцільною металеву площиною амплітуда плоскої хвилі в резонаторі може зрости майже на порядок відносно амплітуди збуджуваного поля.

*Висновки:* Унікальні електродинамічні властивості розглянутої структури можуть знайти застосування в пристроях для підсилення або генерації електромагнітних хвиль у міліметровому та субміліметровому діапазонах, а також для вимірювання електрофізичних властивостей композиційних матеріалів з великими втратами.

*Ключові слова:* двовимірний-періодичний екран, прямокутний хвилевід, резонатор Фабрі–Перо, коефіцієнт відбиття, позамежний хвилевід

*Статья поступила в редакцию 11.11.2015*