

УДК 621.396
PACS 41.20.-q

А. В. Грибовский

Радиоастрономический институт НАН Украины
4, ул. Искусств, Харьков, 61002, Украина
E-mail: grib@rian.kharkov.ua

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕЗОНАТОРОВ ФАБРИ–ПЕРО НА ОСНОВЕ ПЛОСКИХ ЭКРАНОВ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В связи с актуальностью создания новых метаматериалов в последнее время большой интерес вызывают многослойные интерференционные структуры. В результате численного моделирования показано, что конечная последовательность резонаторов Фабри–Перо из плоских экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями в области частот ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов имеет способность локализовать электромагнитную энергию в областях резонаторов. Амплитуда поля в резонаторах на резонансных частотах может превышать амплитуду плоской волны, возбуждающей исследуемую структуру, почти на порядок. Увеличение числа резонаторов приводит к увеличению числа резонансов полного прохождения плоской волны через систему резонаторов. На частотах, значительно превышающих частоту отсечки прямоугольных волноводов, данная структура ведет себя как электромагнитный кристалл, у которого есть зоны «запирания» и зоны «пропускания» электромагнитных волн. Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: резонатор Фабри–Перо, прямоугольный волновод, запертый волновод, электромагнитный кристалл, коэффициент отражения, экран конечной толщины.

Многослойные интерференционные структуры наибольшее распространение получили в оптике [1–3], однако они все чаще находят применение в миллиметровом и терагерцевом диапазоне длин волн [4–5]. Интерес к многослойным структурам вызван еще и тем, что в последнее время активно проводятся исследования, направленные на создание метаматериалов, обладающих уникальными свойствами. Важным достоинством многослойных структур является существование на определенных частотах зон «запирания», когда собственная электромагнитная волна не распространяется. Поэтому, как правило, исследования таких сред проводятся на частотах, при которых проявляется их зонная структура.

В работе [6] представлены результаты численных исследований электродинамических свойств резонатора Фабри–Перо, состоящего из двух различных параллельных идеально проводящих экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями. В такой структуре при ее возбуждении плоской линейно поляризованной электромагнитной волной наблюдается резонанс полного прохождения на длине волны, являющейся запертой для отрезков прямоугольных волноводов, выполненных в зеркалах резонатора. При этом наблюдается сильная локализация электромагнитного поля в объеме резонатора. Для миллиметрового и терагерцевого диапазонов длин волн представляет практический интерес исследование свойств многослойной структуры, состоящей из последовательности резонаторов Фабри–Перо на частотах, где может проявляться не только ее зонная структура, но и способность локализовать электромагнитную энергию в объеме между слоями.

Целью данной работы является исследование в широком частотном диапазоне электродинамических свойств конечной последовательности резонаторов Фабри–Перо из идентичных плоских экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями при возбуждении плоской линейно поляризованной волной.

1. Постановка задачи и метод решения.

Рассмотрим структуру, состоящую из конечного числа резонаторов Фабри–Перо. На рис. 1 изображена последовательность из трех резонаторов Фабри–Перо, образованная четырьмя параллельными экранами (зеркалами) с прямоугольными отверстиями, где \mathbf{q} – вектор амплитуд падающего поля, \mathbf{B} и \mathbf{D} – векторы амплитуд отраженного и прошедшего полей, A_i , C_i – амплитуды электромагнитных волн в резонаторах.

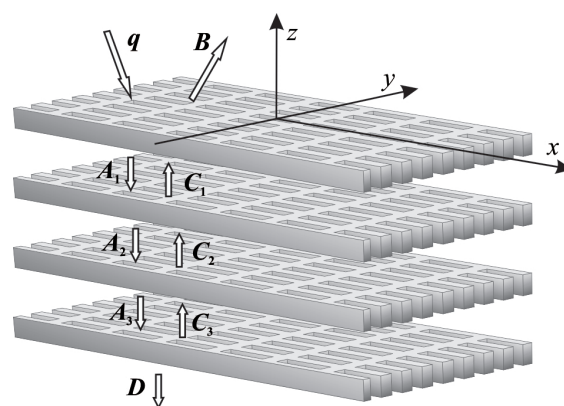


Рис. 1. Последовательность резонаторов Фабри–Перо

Идеально проводящие зеркала резонаторов имеют одинаковую толщину h . Расстояние между зеркалами равно L и выбрано из условия

$L > \lambda$, где λ – длина волны в свободном пространстве. Прямоугольные отверстия в зеркалах имеют одинаковые поперечные сечения $a \times b$ и рассматриваются как отрезки прямоугольных волноводов, в которых может распространяться только основная TE_{10} -волна. Центры волноводных каналов расположены периодически по двум ортогональным направлениям с одинаковыми периодами. Величина периодов равна d и выбрана из условия распространения только одной пространственной гармоники в исследуемом частотном диапазоне ($\lambda > d$).

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 зеркал, представим в виде

$$\vec{E}_t^i = -\frac{1}{\sqrt{S}} \exp(-ikz) \times \vec{e}_y,$$

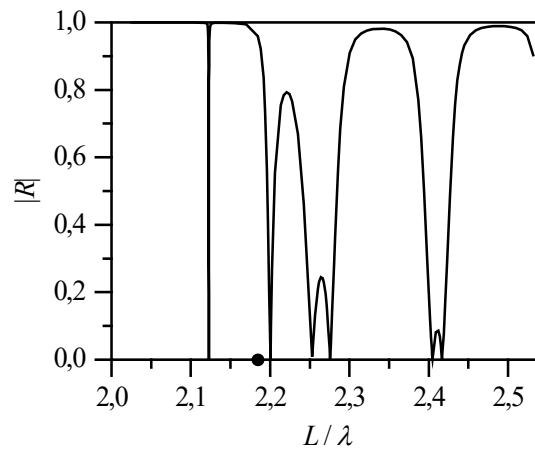
где $k = 2\pi/\lambda$, $S = d \times d$, \vec{e}_y – единичный орт.

Направление поляризации в падающей волне выбрано из условия наиболее эффективного возбуждения основной волны в прямоугольных волноводных каналах. Необходимо определить электромагнитное поле вне структуры и внутри между слоями. Численные исследования электродинамических характеристик данной структуры проводились с помощью операторного метода решения задач дифракции на многослойных структурах [7]. Алгоритм решения ключевых задач дифракции на решетке полубесконечных прямоугольных волноводов и результаты расчета операторов рассеяния опубликованы в работе [8].

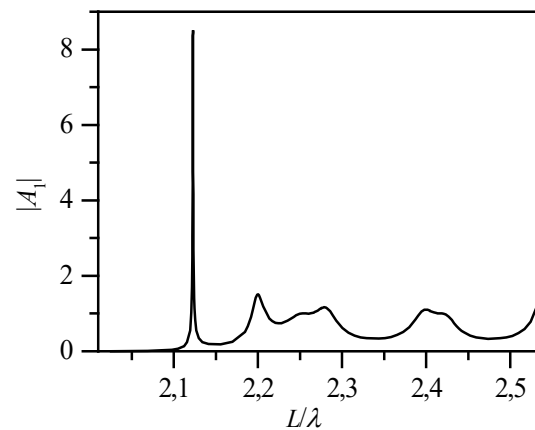
2. Результаты численного моделирования. Исследования электродинамических характеристик последовательности резонаторов Фабри–Перо в широком частотном диапазоне начнем с резонатора, образованного двумя одинаковыми зеркалами с прямоугольными отверстиями. В работе [6] описаны исследования подобного резонатора для случая зеркал разной толщины и с разными сечениями прямоугольных волноводов. Исследования проводились в низкочастотной области, где наблюдался резонанс полного прохождения на частоте ниже критической для прямоугольных волноводов. При этом амплитуда поля в резонаторе увеличивалась в 4,5 раза по сравнению с амплитудой возбуждающего поля.

На рис. 2, а и б представлены графики зависимостей модуля коэффициента отражения плоской волны от резонатора Фабри–Перо и модулей амплитуд электрического поля в объеме резонатора от длины волны при следующих параметрах: $h/d = 3,333$, $d/\lambda_{cut} = 0,75$, $b/\lambda_{cut} = 0,15$,

$h/\lambda_{cut} = 2,5$, $L/\lambda_{cut} = 2,17$, $\lambda_{cut} = 2a$ – критическая длина основной TE_{10} -волны прямоугольного волновода.



а)



б)

Рис. 2. Графики зависимостей модуля коэффициента отражения (а) и амплитуд плоской волны (б) в резонаторе Фабри–Перо от длины волны

Точкой на горизонтальной оси рис. 2, а отмечено значение критической длины волны прямоугольного волновода $L/\lambda_{cut} = 2,17$. Из графиков следует, что в низкочастотной области исследуемой полосы частот наблюдается резонанс полного прохождения плоской волны через резонатор на частоте ниже критической для прямоугольных волноводов. При этом происходит сильная локализация электромагнитного поля в объеме резонатора. Амплитуда плоской волны в резонаторе увеличивается почти на порядок по сравнению с амплитудой падающего поля. На более высоких частотах проявляется зонная структура резонатора Фабри–Перо. Появляются зоны «запирания» и зоны «пропускания» электромагнитного поля, которые свойственны электромагнитным кристаллам.

Исследование частотно-селективных свойств одного экрана в отдельности показало, что при данных геометрических параметрах отсутствуют резонансы полного прохождения электромагнитной волны на частотах ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов. Полное или частичное прохождение электромагнитного поля наблюдается на частотах, при которых по длине волноводных каналов укладывается приблизительно целое число распространяющихся волноводных длин полуволн.

Увеличение числа резонаторов, расположенных последовательно друг за другом на одинаковом расстоянии, приводит к появлению дополнительных резонансов полного прохождения электромагнитной волны с сильной локализацией электромагнитного поля в объеме каждого резонатора на частотах ниже критической для прямоугольных волноводов. Причем добротность резонансов увеличивается с увеличением числа резонаторов, а значения резонансных частот приближаются друг к другу. На более высоких частотах, по сравнению с частотой отсечки прямоугольных волноводов, зонная структура последовательности резонаторов Фабри–Перо проявляется более отчетливо. Форма зон «запирания» приближается к прямоугольной форме.

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики зависимостей модулей коэффициентов отражения плоской волны от последовательности двух и трех резонаторов Фабри–Перо и модулей амплитуд электрического поля в объеме каждого резонатора от длины волны при параметрах, аналогичных предыдущему случаю.

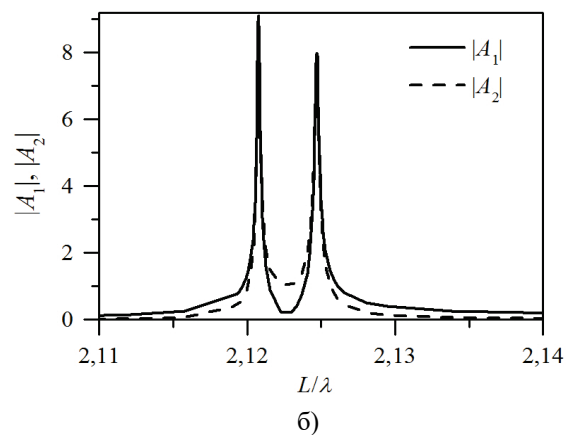
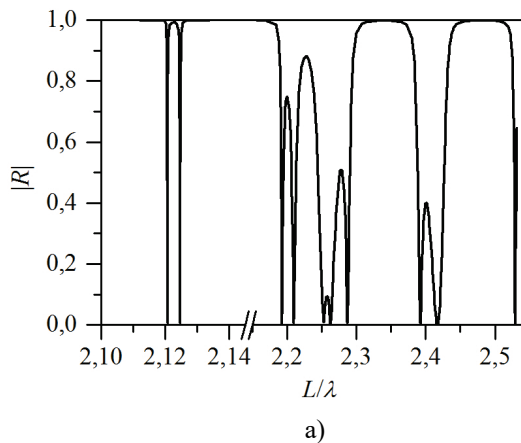


Рис. 3. Графики зависимостей модуля коэффициента отражения двух резонаторов Фабри–Перо (а) и модулей амплитуд плоской волны в двух резонаторах (б) от длины волны

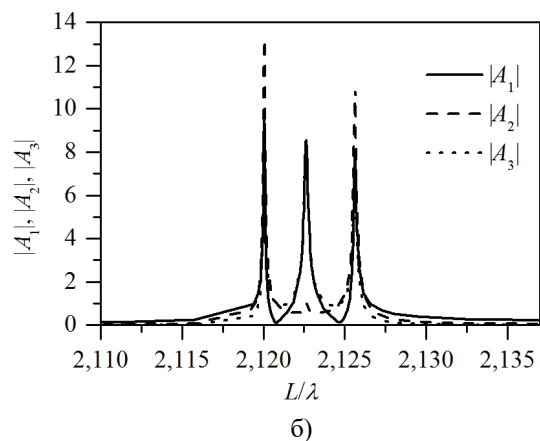
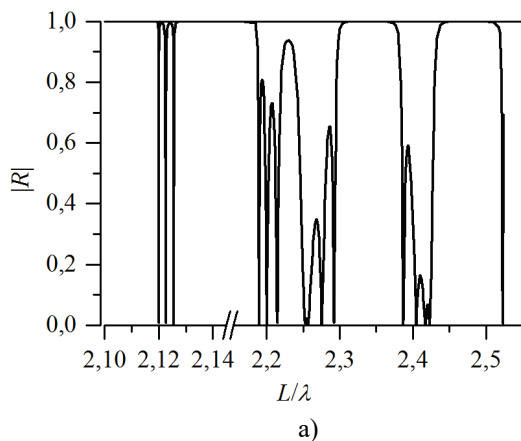


Рис. 4. Графики зависимостей модуля коэффициента отражения трех резонаторов Фабри–Перо (а) и модулей амплитуд плоской волны в трех резонаторах (б) от длины волны

Из графиков следует, что последовательность резонаторов Фабри–Перо из плоских экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями обладает уникальными свойствами. На низких частотах, по сравнению с частотой отсеч-

ки прямоугольных волноводов, данная структура обладает свойством локализовать электромагнитную энергию в объемах резонаторов. Амплитуда электромагнитного поля в резонаторах на резонансных частотах может возрастать почти на по-

рядок по сравнению с амплитудой возбуждающего поля. На высоких частотах проявляются зонные свойства последовательности резонаторов, присущие электромагнитным кристаллам, у которых имеются зоны «запираания» и зоны «пропускания» электромагнитных волн.

Выводы. Таким образом, численное моделирование электродинамических свойств конечной последовательности резонаторов Фабри–Перо из плоских экранов конечной толщины с прямоугольными отверстиями показало следующие результаты. Установлено, что в области частот ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов данная структура имеет свойство локализовать электромагнитную энергию в областях резонаторов. Амплитуда поля в резонаторах на резонансных частотах может превышать амплитуду плоской волны, возбуждающей исследуемую структуру, почти на порядок. Увеличение числа резонаторов приводит к увеличению числа резонансов полного прохождения плоской волны через систему резонаторов. Причем число резонансов равно числу резонаторов, а спектр резонансных частот с увеличением числа резонаторов сгущается, оставаясь в области ниже частоты отсечки прямоугольных волноводов. На частотах, значительно превышающих частоту отсечки прямоугольных волноводов, данная структура ведет себя как электромагнитный кристалл, у которого есть зоны «запираания» и зоны «пропускания» электромагнитных волн. Обнаруженные уникальные свойства последовательности резонаторов Фабри–Перо могут найти применение в различных устройствах. Например, поместив в области резонаторов активные материалы или материалы с нелинейными свойствами, можно управлять параметрами структуры, путем подачи напряжения на зеркала резонаторов. На основе таких элементов можно создавать усилители и генераторы электромагнитных колебаний, а также устройства с управляемыми нелинейными характеристиками.

Библиографический список

1. Grigoriev V. Bistability, multistability and non-reciprocal light propagation in Thue-Morse multilayered structures. *New J. Phys.* 2010. Vol. 12. P. 053041(20 p.).
2. Zhukovsky S. V. Perfect transmission and highly asymmetric light localization in photonic multilayers. *Phys. Rev. A.* 2010. Vol. 81, N. 5. P. 053808(6 p.).
3. Zhukovsky S. V. All-optical diode action in asymmetric nonlinear photonic multilayers with perfect transmission resonances. *Phys. Rev. A.* 2011. Vol. 83, N. 2. P. 023818(6 p.).
4. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор). *Журнал технической физики.* 2013. Т. 83, вып. 1. С. 3–28.
5. Ветлужский А. Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов. *Журнал радиоэлектроники.* 2015. № 1. С. 1–7.
6. Грибовский А. В., Кузьмичев И. К. Резонатор Фабри–Перо, образованный двумя экранами с прямоугольными

отверстиями. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2016. Т. 21, № 1. С. 58–64.

7. Lytvynenko L. M. and Prosvirnin S. L. *Wave Diffraction by Periodic Multilayer Structure.* Cambridge: Scientific Publ., 2012. 158 p.
8. 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.

REFERENCES

1. Grigoriev, V., 2010. Bistability, multistability and non-reciprocal light propagation in Thue-Morse multilayered structures. *New J. Phys.*, **12**, pp. 053041(20 p.).
2. Zhukovsky, S. V., 2010. Perfect transmission and highly asymmetric light localization in photonic multilayers. *Phys. Rev. A*, **81**(5), pp. 053808(6 p.).
3. Zhukovsky, S. V., 2011. All-optical diode action in asymmetric nonlinear photonic multilayers with perfect transmission resonances. *Phys. Rev. A*, **83**(2), pp. 023818(6 p.).
4. Vendik, I. B., Vendik, O. G., 2013. Metamaterials and their Application in the Technology of Ultrahigh Frequencies (Review). *Tech. Phys.*, **83**(1), pp. 3–28 (in Russian).
5. Vetluzhskiy, A. Y., 2015. Effective electrophysical properties of metallic electromagnetic crystals. *Zhurnal radioelektroniki*, **1**, pp. 1–7 (in Russian).
6. Gribovsky, A. V., Kuz'michev, I. K., 2016. Fabry–Perot resonator formed by two screens with rectangular holes. *Radiofizika i radioastronomija*, **21**(1), pp. 58–64 (in Russian).
7. Lytvynenko, L. M. and Prosvirnin, S. L., 2012. *Wave Diffraction by Periodic Multilayer Structure.* Cambridge: Scientific Publ.
8. Gribovsky, A. V., Prosvirnin, S. L. and Reznik, I. I., 1997. Reflecting Phased Array Antenna Consisting of Rectangular Waveguides of Finite Depth. *Radiofizika i radioastronomija*, **2**(1), pp. 52–60 (in Russian).

Рукопись поступила 25.05.2017.

A. V. Gribovsky

THE QUASIPERIODIC SEQUENCE OF FABRY–PEROT RESONATORS BASED ON PLANE SCREENS OF FINITE THICKNESS WITH RECTANGULAR HOLES

In connection with the urgency of creating new metamaterials, multilayer interference structures are recently of great interest. The quasiperiodic sequence of Fabry–Perot resonators based on plane screens of finite thickness with rectangular holes are investigated. It is shown that the finite sequence of Fabry–Perot resonators of flat screens of finite thickness with rectangular holes in the frequency region below the cutoff frequency of rectangular waveguides has the ability to localize electromagnetic energy in the regions of the resonators. The amplitude of the field in resonators at resonant frequencies can exceed the amplitude of the plane wave exciting the structure under investigation by almost an order of magnitude. It is established that an increase in the number of resonators leads to an increase in the number of the total passage resonances of a plane wave through a system of resonators. This structure behaves like an electromagnetic crystal that has zones of «blocking» and zones of «transmission» of electromagnetic waves at frequencies much higher than the cutoff frequency of rectangular waveguides.

Key words: Fabry–Perot resonator, rectangular waveguide, transverse waveguide, electromagnetic crystal, reflection coefficient, screen of finite thickness.

О. В. Грибовський

**КВАЗИПЕРИОДИЧНА ПОСЛІДОВНІСТЬ
РЕЗОНАТОРІВ ФАБРІ–ПЕРО НА ОСНОВІ
ПЛОСКИХ ЕКРАНІВ СКІНЧЕННОЇ ТОВЩИНИ
З ПРЯМОКУТНИМИ ОТВОРАМИ**

У зв'язку з актуальністю створення нових метаматеріалів останнім часом великий інтерес викликають багатошарові інтерференційні структури. У результаті чисельного моделювання показано, що скінченна послідовність резонаторів Фабрі–Перо з плоских екранів скінченної товщини з прямокутними отворами в області частот нижче частоти відсічення

прямокутних хвилеводів має здатність локалізувати електромагнітну енергію в областях резонаторів. Амплітуда поля в резонаторах на резонансних частотах може перевищувати амплітуду плоскої хвилі, яка збуджує досліджувану структуру, майже на порядок. Збільшення числа резонаторів призводить до збільшення числа резонансів повного проходження плоскої хвилі через систему резонаторів. На частотах, які значно перевищують частоту відсічення прямокутних хвилеводів, дана структура поводить себе як електромагнітний кристал, у якого є зони «замикання» і зони «пропускання» електромагнітних хвиль.

Ключові слова: резонатор Фабрі–Перо, прямокутний хвилевід, позамежний хвилевід, електромагнітний кристал, коефіцієнт відбиття, екран скінченної товщини.