

# ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ О-ТИПА

Одаренко Е. Н.<sup>1</sup>, Шматько А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиозлектроники  
пл. Ленина, 14, Харьков, 61166, Украина, тел.: (057) 7021057; e-mail: oen@kture.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина  
тел.: (057) 7075133; e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

**Аннотация** — Исследуется пространственное распределение электромагнитного поля ТМ волн в поперечном сечении фотонно-кристаллических волноводов. Наличие локализованных мод с максимумом интенсивности поля в центральной части волноводов позволяет применять их в качестве пролетных каналов для электронных потоков различного поперечного сечения и формирования на этой основе многопучковых электронно-волновых систем терагерцового диапазона.

## I. Введение

Одним из основных направлений развития современной вакуумной электроники является разработка приборов коротковолновой части мм и субмм диапазона. Снижение сопротивления связи и уменьшение размеров элементов замедляющих систем в этом диапазоне обуславливают необходимость поиска новых схем приборов, которые обеспечивают эффективный энергообмен потоков заряженных частиц с электромагнитными полями. Решение этих проблем во многом связано с совершенствованием электродинамических систем. Интенсивные экспериментальные и теоретические исследования искусственных периодических структур различной размерности — фотонных кристаллов, обусловленные значительными успехами в технологии их изготовления, показали широкие возможности их применения в активных и пассивных устройствах различных частотных диапазонов [1].

Сравнительно простое масштабирование фотонных кристаллов и большой выбор материалов для их изготовления позволяют создавать электродинамические системы различного функционального назначения. Поэтому актуальной является задача применения таких структур в электронных приборах с целью увеличения рабочей частоты вплоть до терагерцового диапазона.

В данной работе рассматриваются электродинамические свойства фотонно-кристаллических структур, которые позволяют использовать их для взаимодействия с цилиндрическими и ленточными электронными потоками в электронных приборах О-типа.

## II. Основная часть

Практическое применение фотонных кристаллов, как и вообще периодических систем, связано прежде всего с их полосовыми свойствами, т. е. наличием зон пропускания и запирания. Поэтому оказывается возможной локализация электромагнитной энергии в определенных областях фотонно-кристаллических структур и создание на этой основе волноводящих и резонаторных систем. Такая локализация реализуется в запрещенных зонах, которые обычно называют фотонными запрещенными зонами.

Формирование фотонно-кристаллических волноводов и резонаторов основывается на нарушении периодичности структуры, т. е. внесении в нее дефекта. Если волноводный канал является прямоли-

нейным и пустотелым, то через него можно пропустить электронный поток. В зависимости от фазовой скорости электромагнитных волн и скорости электронов возможны различные варианты их взаимодействия. Например, в линейном фотонно-кристаллическом волноводе наличие волн с фазовой скоростью, близкой к скорости света, позволяет формировать схему ускорителя электронов [2]. В то же время некоторые конфигурации волноводов обеспечивают замедление фазовой скорости до уровня 0.4-0.5с, что дает возможность синхронизации со слаборелятивистскими электронными потоками [3].

Наряду с линейными волноводами, которые формируются путем удаления одного или нескольких рядов элементов периодической структуры, для передачи электромагнитной энергии применяются также так называемые дырчатые волноводы [4]. Для взаимодействия с потоком заряженных частиц необходимо наличие компоненты напряженности электрического поля, параллельной образующим элементам, формирующих периодическую структуру. Такая поляризация (ТМ) обеспечивается при размещении в вакууме периодической системы диэлектрических цилиндров. На рис. 1 представлена дисперсионная диаграмма для случая, когда цилиндры расположены в узлах прямоугольной сетки. Численные расчеты проводились с помощью свободно распространяемой программы MIT Photonic Bands (MPB) [5]. На рис. 1 отмечена запрещенная зона, в пределах которой невозможно распространение электромагнитных волн в периодической структуре и возможна локализация электромагнитного поля в дефектах. Границы этой зоны соответствуют нормированным значениям частоты  $\omega a/2\pi c = 0.2876$  и  $0.4228$ ,  $a$  — пространственный период (расстояние между центрами цилиндров).

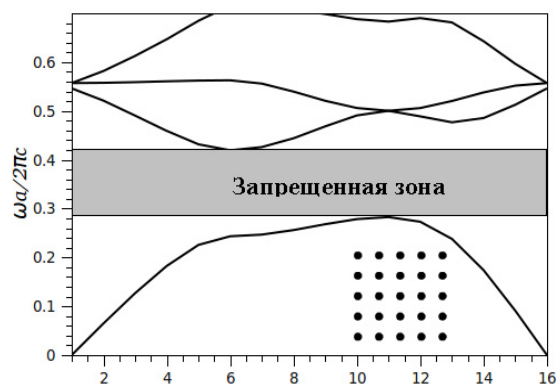


Рис. 1. Дисперсионная диаграмма для ТМ поляризации.

Fig. 1. Band structure for TM modes

На рис. 3 представлены результаты расчета пространственного распределения напряженности про-

дольного электрического поля (перпендикулярного плоскости рисунка) для различных конфигураций фотонно-кристаллических резонаторов, которые представляют собой поперечное сечение волновода. Вертикальные штриховые линии показывают границы дефекта периодической структуры. Для данных собственных режимов структуры максимальное значение амплитуды поля реализуется в центре волноводного канала, через который можно пропускать ленточный или цилиндрический поток электронов. Очевидно, что наибольшая степень заполнения пролетного канала может быть реализована при использовании основной моды.

Неоднородность поперечного распределения высокочастотного поля в пределах дефекта обуславливает необходимость использования трехмерных моделей для исследования закономерностей электронно-волнового взаимодействия в рассмотренных фотонно-кристаллических волноводах [6].

### III. Заключение

Применение фотонно-кристаллических волноводов в электронно-волновых системах позволяет размещать ленточные или цилиндрические электронные потоки в области максимальной интенсивности высокочастотного электрического поля. Таким образом можно добиться увеличения сопротивления связи в электронных приборах терагерцового диапазона и за счет этого повысить эффективность взаимодействия.

### IV. Список литературы

- [1] *Joannopoulos J. D., Meade R. D., Winn J. N.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton Univ. Press, 1995. 137 p.
- [2] *Cowan B. M.* Two-dimensional photonic crystal accelerator structures // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2003. Vol. 6. P. 101301-1–101301-6.
- [3] *Одаренко Е. Н., Шматько А. А.* Фотонно-кристаллические замедляющие структуры в электронике терагерцового диапазона // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 12—16 сент. 2011 г.). Севастополь: Вебер, 2011. Т.1. С. 275-276.
- [4] *Желтиков А. М.* Дырчатые волноводы // *Успехи физических наук.* 2000. №11. С.1203–1215.

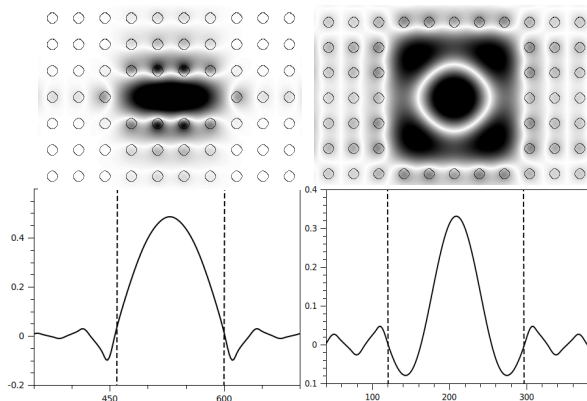


Рис. 2. Распределение электрического поля в поперечном сечении ПК волновода.

Fig. 2. Electric field cross sections for different modes of PC fiber

- [5] *Johnson S. G., Joannopoulos J. D.* Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis // *Optics Express.* 2001. No. 3. P. 173–190.
- [6] *Одаренко Е. Н., Шматько А. А.* Нелинейная теория неавтономных многомерных электронно-волновых систем миллиметрового диапазона (усилители и умножители) // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2007. №10. С.33–45.

## PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES IN O-TYPE ELECTRON DEVICES

Odarenko E. N.<sup>1</sup>, Smat'ko A. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kharkiv National University of Radioelectronics  
14, Lenin ave., Kharkov, 61166, Ukraine  
phone: (057) 7021057, e-mail: oen@kture.kharkov.ua*

<sup>2</sup>*V. N. Karazin Kharkiv National University  
4, Svobody Sq., Kharkov, 61022, Ukraine  
phone: (057) 7075133*

*e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua*

**Abstract** — Spatial distribution of the TM modes electromagnetic field in the photonic crystal fibers cross sections is investigated. Existence of the confined modes with field intensity maximum at the waveguides center allows forming channels for sheet and pencil electron beams. This scheme can be used for development of the terahertz multi-beam O-type electron devices.

### I. Introduction

Development of the effective terahertz radiation sources is the one of basic lines of development of the modern vacuum electronics. Coupling impedance decreasing and miniaturization of the electrodynamic systems elements stimulate the searching of the new devices schemes with effective beam-wave interaction. Results of the numerous experimental and theoretical investigations of the photonic crystals show possibilities of their wide application in active and passive elements for different frequency ranges.

In this report the electrodynamic properties of the photonic crystal structures, which can be used for interaction with sheet and pencil electron beams in O-type devices, are considered.

### II. Main Part

Forming of the photonic crystal waveguides is performed via breaking of the structure periodicity in one direction by creating linear defects. Hollow waveguides may be used for passing of the sheet and pencil electron beams. These structures are very promising for accelerating of charged particles [2] and beam-wave interaction [3]. There is another type of photonic crystal waveguides, the photonic crystal fiber. In this report we consider waveguides formed by removing some elements of square lattice of dielectric cylinders in air. Such bulk crystal has band gap for TM modes (fig. 1). The MIT Photonic Bands (MPB) package, a public-domain code using an iterative eigen-solver technique [5], is used for this dispersion diagram calculation. Fig. 2 shows spatial distribution of the electric field for different modes of photonic crystal resonators that represent waveguides cross sections. It is clear that the field maximum is forming at the central part of waveguide channel. Thus photonic crystal waveguides may be used as effective electrodynamic systems of the terahertz O-type electron devices.

### III. Conclusion

It is shown that the photonic crystal waveguides (fiber-like) may be used for passing of the sheet and pencil electron beams and forming terahertz beam-wave system with increased coupling impedance due to longitudinal electric field spatial distribution at waveguide cross section.