

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Одаренко Е. Н.¹, Шматько А. А.²

¹Харьковский национальный университет радиозлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина
тел.: 057-7021057, e-mail: oen@kture.kharkov.ua

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
тел.: 057-7075133, e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

Аннотация — Исследуются дисперсионные характеристики двумерных фотонных кристаллов с линейным дефектом в виде гребенчатого волновода. Результаты численного моделирования свидетельствуют о существовании в фотонно-кристаллическом волноводе с гребенчатой стенкой замедленных волн, которые можно использовать для создания электронных приборов с длительным взаимодействием в терагерцовом диапазоне.

I. Введение

Одной из основных задач электроники СВЧ в настоящее время является разработка эффективных источников излучения малой и средней мощности в терагерцовом и субтерагерцовом диапазоне. Использование для этой цели классических приборов связано с проблемами технологического и физического плана. В первую очередь это касается изготовления электродинамических систем и обеспечения необходимого сопротивления связи в приборе.

В настоящее время при разработке высокочастотных электродинамических систем различного функционального назначения широко используются периодические структуры, которые получили название фотонные кристаллы [1]. Современный уровень развития технологий позволяет формировать такие структуры с периодом, соответствующим довольно широкому диапазону рабочих частот — от СВЧ до оптического диапазона. Наличие запрещенных зон в фотонных кристаллах позволяет за счет нарушения их периодичности обеспечить локализацию электромагнитной энергии на определенных участках электродинамической системы. Ускорение потоков заряженных частиц лазерным излучением [2] является примером применения фотонных кристаллов в электронно-волновых системах. Для эффективного взаимодействия нерелятивистского электронного потока с волноводной волной необходимо, чтобы электродинамическая система обеспечивала требуемое для электронно-волнового взаимодействия замедление.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с формированием локализованной в гребенчатом фотонно-кристаллическом волноводе замедленной электромагнитной волны терагерцового диапазона, пригодной для длительного взаимодействия с нерелятивистским потоком заряженных частиц.

II. Основная часть

Исследование свойств фотонно-кристаллического волновода проводится в рамках двумерной модели, когда вдоль координатной оси Oz структура считается однородной и бесконечной. Базовыми конфигурациями для формирования двумерной периодической структуры являются диэлектрические цилиндрические стержни, расположенные в вакууме или пустотелые цилиндрические отверстия в однородном

изотропном диэлектрике [1]. Схема расположения элементов двумерного фотонного кристалла может быть гексагональной (в узлах прямоугольной решетки) и тетрагональной (в узлах решетки из равносторонних треугольников). Ось Oz считается направленной вдоль образующих цилиндров. В таких структурах обычно выделяется две поляризации излучения — ТМ и ТЕ. Первый тип поляризации соответствует отличной от нуля продольной компоненте напряженности электрического поля E_z . ТЕ-поляризация характеризуется наличием поперечных компонент электрического поля.

Расчет дисперсионных характеристик фотонных кристаллов с локальными нарушениями периодичности расположения элементов проводится с помощью программного пакета MIT Photonic Bands (MPB), разработанного С. Джонсоном [3]. Анализ дисперсионных характеристик позволяет определить области собственных частот полос пропускания и запираания в периодической структуре и фазовую скорость волн, распространяющихся в данной системе.

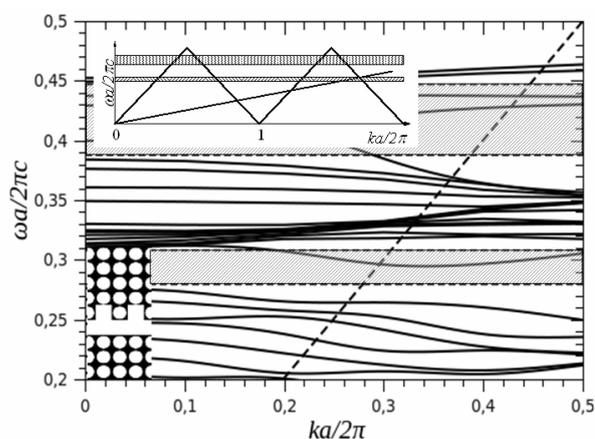


Рис. 2. Дисперсионные характеристики гребенчатого волновода.

Fig. 2. The band diagram of a corrugated PhC waveguide

Известно, что фотонные кристаллы из диэлектрических стержней имеют запрещенные зоны преимущественно для ТМ-поляризации и поэтому не могут использоваться для формирования волновода с продольной компонентой электрического поля, необходимой для энергообмена с направленным потоком заряженных частиц. Запрещенные зоны для ТЕ-поляризации имеет фотонный кристалл, сформированный цилиндрическими отверстиями в диэлектрике. Далее в работе рассматривается гексагональный вариант расположения элементов периодической структуры, который имеет две основных запрещенных зоны.

Известно, что наличие линейного дефекта в фотонном кристалле приводит к возможности существования волнового процесса в пределах запрещенных зон, т. е. эти волны будут «заперты» в пределах дефекта (волновой канал). Их фазовая скорость больше или близка к скорости света. Для получения большего коэффициента замедления можно использовать волновод с гребенчатыми стенками. На рис. 1 представлены результаты расчета дисперсионных характеристик модифицированного фотонно-кристаллического волновода с гребенчатой стенкой. Заштрихованные области на диаграмме соответствуют запрещенным зонам структуры без дефекта. Штриховая линия построена для случая, когда фазовая скорость равна скорости света. a — пространственный период. Сечение исследуемой структуры в плоскости xu показано на нижней части рис. 1. Наряду с большим количеством быстрых и медленных волн, распространяющихся в перфорированном диэлектрике, в волноводе существует волна с довольно большим коэффициентом замедления, которая может синхронизироваться с нерелятивистским электронным потоком. На бриллюэновской диаграмме (верхняя часть рис. 1) видно, что на обратной волне второй пространственной гармоники замедление достигает величины 5,9.

На рис. 2 представлена схема исследуемой структуры и пространственное распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля для медленной волноводной волны.

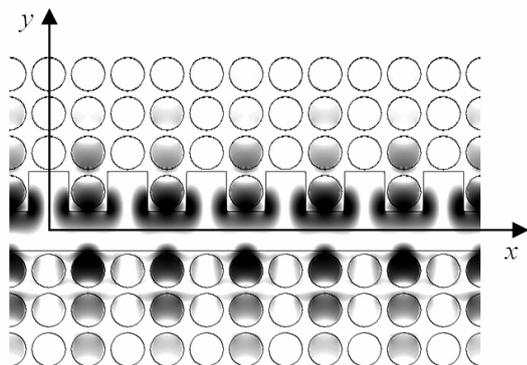


Рис. 2. Распределение электрического поля волны в ФК волноводе.

Fig. 2. The spatial distribution of the longitudinal electric field in the PhC waveguide

С помощью дисперсионной диаграммы можно оценить величину периода фотонного кристалла, необходимую для обеспечения взаимодействия медленной волны с электронным потоком. Например, для частоты 3 ТГц $a \cong 30$ мкм, что вполне реализуемо на практике при современном уровне развития технологии изготовления фотонных кристаллов.

III. Заключение

Установлено, что в фотонно-кристаллическом волноводе с гребенчатой стенкой существуют замедленные волны терагерцового диапазона, которые можно использовать для взаимодействия с электронным потоком. В фотонном кристалле с тетрагональной системой отверстий первая запрещенная зона шире, чем в гексагональной схеме. Поэтому для нее также можно обеспечить условия существования замедленных волн в волновом канале структуры.

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] 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.

SLOW-WAVE PBG STRUCTURES FOR TERAHERTZ ELECTRONICS

Odarenko E. N., Shmat'ko A. A.

Kharkov National University of Radioelectronics
14, Lenin av., Kharkov, 61166, Ukraine
Ph.: 057-7021057, e-mail: oen@kture.kharkov.ua
Kharkov National University
4, Svobody Sq., Kharkov, 61077, Ukraine
Ph.: 057-7075133,
e-mail: alexandr.a.shmatko@univer.kharkov.ua

Abstract — Dispersion characteristics of the 2D photonic crystal with vacuum corrugated waveguide introduced are investigated. Slow-wave modes of the photonic crystal waveguide are obtained for different phase velocities. These modes are suitable for synchronization with non-relativistic electron beam.

I. Introduction

Development of the effective terahertz low power radiation sources is the important problem of the vacuum electronics. Efficiency of the classical microwave devices decreases in this band. The most critical problems are the slow-wave structures fabrication and coupling impedance decrease.

Periodical structures are also known as photonic crystals and band gap structures widely used for development of the various electrodynamic systems. Modern technologies allow making these structures for very wide frequency range — from microwave range to quasioptical one. A line defect of the photonic crystal can act as a waveguide. The electromagnetic wave is localized in a waveguide for frequencies in the band gap of the crystal.

In this report the forming of the slow wave in the corrugated photonic crystal waveguide has been considered. In this case the prolonged beam-wave interaction in the waveguide channel may be realized in terahertz band.

II. Main Part

Corrugated waveguide is formed in the photonic crystal lattice with hexagonal scheme of the vacuum holes in the dielectric substrate. Lattice constant is a . It is known that the band gaps for TE modes are formed for this photonic crystal structure. These modes have electric field components in the plane of the structure and can be used for beam-wave interaction in the waveguide. The MIT Photonic Band (MPB) package, a public-domain code using an iterative eigen solver technique [3], is used for dispersion diagram calculation.

Fig. 1 shows the band diagram for a corrugated crystal waveguide. The dashed line indicates the light line. Introduction of the defect results in a guided band lying inside the band gap. Slow-wave mode represented by this band is localized within the defect, as shown in Fig. 2. Phase velocity of this wave is about $0.17c$ for the 2nd spatial harmonic (see the top inset in Fig. 1). In a terahertz band the lattice constant should be about tens of microns.

III. Conclusion

There are terahertz slow waves in the corrugated photonic crystal linear waveguide. Thus the non-relativistic prolonged beam-wave interaction can be realized in this structure as well as in the photonic crystal with a triangular lattice of holes.