

**ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

Одной из основных технологических проблем при изготовлении электронных приборов, которые возникают при переходе в терагерцовый диапазон, является уменьшение геометрических размеров их элементов и, соответственно, уменьшение периода замедляющих систем. Наряду с ужесточением допусков на эти размеры происходит увеличение омических потерь в металле, что приводит к снижению добротности резонансных систем. В результате даже при довольно высоком современном уровне технологий изготовления металлических элементов электродинамических систем увеличение рабочей частоты приводит к значительному ухудшению эксплуатационных характеристик электровакуумных приборов малой и средней мощности. Применение диэлектрических замедляющих систем также не позволяет значительно продвинуться в решении этих задач из-за проблем теплоотвода и особенностей взаимодействия с электронными потоками.

Новые возможности для совершенствования электродинамических систем приборов терагерцового диапазона появляются в настоящее время за счет бурного развития физики и техники искусственных материальных сред с необычными свойствами – метаматериалов [1, 2]. Разновидность таких материалов, которая обладает свойством периодичности в одном или нескольких направлениях, получила название электромагнитных или фотонных кристаллов [3, 4]. Материальные среды с аналогичными свойствами исследовались и ранее, причем для них использовался термин «искусственные диэлектрики» [5 – 7]. Однако только современный уровень технологий изготовления многомерных периодических сред позволил проводить интенсивные экспериментальные исследования в широком частотном диапазоне (от СВЧ до оптического) и создавать на этой основе различные функциональные устройства.

Принципиальная возможность реализации взаимодействия полей фотонно-кристаллических структур с электронными потоками базируется на формировании линейных нарушений периодичности, которые обладают ярко выраженными волноводными свойствами в полосах запирающей идеальной периодической системы [8]. Таким образом, пустотелый канал в фотонном кристалле определенной конфигурации можно использовать для пропускания линейного электронного потока, который будет взаимодействовать с волноводной модой. Такой подход используется для формирования ускорительных систем, где электроны в процессе движения взаимодействуют с быстрыми волнами фотонно-кристаллического волновода, фазовая скорость которых близка к скорости света [9]. В этих устройствах отсутствует необходимость пропускания пучка вплотную к поверхности электродинамической системы для обеспечения достаточного значения сопротивления связи, что обусловлено закономерностями пространственного распределения напряженности электрического поля в пролетном канале. Следовательно, такая электронно-волновая система пригодна для энергообмена электронных потоков с полем замедленных волн. Поскольку в настоящее время существуют достаточно развитые технологии изготовления фотонных кристаллов на длинах волн до единиц микрон и меньше, то представляется перспективным применение этих структур в качестве электродинамических систем электронных приборов терагерцового диапазона. Для этой цели необходимо обеспечить существование замедленных волн определенной поляризации в волноведущем канале. Поэтому актуальна задача поиска и анализа таких структур, поддерживающих существование волн с фазовой скоростью, меньшей скорости света.

В данной работе рассматривается ряд конфигураций фотонно-кристаллических волноводов, в которых существуют медленные волны, анализируются их дисперсионные характеристики и пространственное распределение напряженности электрического поля для различных поляризаций излучения.

Фотонно-кристаллические структуры

Типичными базовыми конфигурациями двумерных фотонно-кристаллических структур являются массивы бесконечных диэлектрических цилиндров различного поперечного сечения, расположенных в узлах сетки определенной симметрии, а также наборы цилиндрических отверстий в однородном диэлектрике [3]. Наиболее распространенные варианты периодического размещения элементов структуры – квадратный и треугольный, которые представлены на рис. 1 совместно с принятой системой координат. Черным цветом обозначены диэлектрические элементы. Далее рассматриваются фотонные кристаллы с одинаковым пространственным периодом вдоль характерных направлений решетки. Важным отличием двумерных фотонных кристаллов от одномерных является существование запрещенных зон одновременно для всех направлений в плоскости (x, y) . В пределах этих частотных диапазонов распространение волн в структуре невозможно. Следует отметить, что ширина и само существование этих диапазонов зависят от геометрических и материальных параметров структуры – отношения поперечных размеров цилиндров к постоянной решетки a и диэлектрической проницаемости ее элементов ε . Кроме того, различные схемы периодических структур характеризуются запрещенными зонами для разной поляризации излучения. Известно, что системам диэлектрических цилиндров в вакууме (рис. 1, *а*, *б*) соответствуют запрещенные зоны для ТМ поляризации, где вектор напряженности электрического поля направлен вдоль образующих цилиндров. Для предотвращения распространения волн ТЕ поляризации в структуре следует использовать диэлектрик, перфорированный цилиндрическими отверстиями (рис. 1, *в*, *г*).

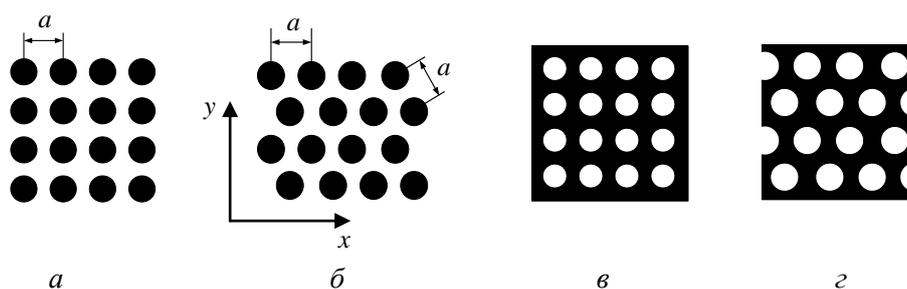


Рис. 1

Для наглядного представления спектральных свойств периодических структур используются дисперсионные характеристики, которые обычно строятся в пределах первой зоны Бриллюэна, где расположены все неэквивалентные значения волнового числа. Зоны Бриллюэна строятся относительно обратной решетки фотонного кристалла, т. е. в пространстве волновых чисел. Начало координат выбирается в одном из узлов обратной решетки. Плоскости, проходящие через середины векторов трансляции, проведенных из центра к ближайшим узлам, ограничивают первую зону Бриллюэна. На рис. 2 представлены первые зоны Бриллюэна для фотонного кристалла с прямоугольной (рис. 2, *а*) и треугольной (рис. 2, *б*) сеткой, в узлах которой расположены элементы периодической структуры. Заштрихованные треугольники представляют собой так называемые неприводимые зоны Бриллюэна, в которых производится расчет дисперсионных характеристик. Все остальные области первой зоны могут быть получены из неприводимой с помощью элементарных преобразований симметрии.

На рис. 3 представлены результаты расчета дисперсионных характеристик для периодических структур, состоящих из вакуумных цилиндров радиуса r , размещенных в узлах прямоугольной и треугольной решетки. По оси абсцисс отложено нормированное волновое число, для обозначения которого используются буквы, соответствующие характерным точкам зон Бриллюэна. По оси ординат отложена нормированная частота, которая измеряется относительно величины c/a (c – скорость света в вакууме). Значения параметров системы выби-

рались следующими: $r/a = 0.45$ и $\epsilon = 12$. На врезках к рисункам показаны схемы размещения элементов периодической структуры. Сплошными кривыми показаны дисперсионные характеристики для ТЕ поляризации излучения (вектор напряженности электрического поля перпендикулярен образующим цилиндрам), штриховые кривые соответствуют ТМ поляризации. Горизонтальные затемненные полосы обозначают частотные запрещенные зоны. Численные расчеты проводились с помощью свободно распространяемого программного пакета MIT Photonic Bands (MPB), который основан на методе плоских волн и широко используется для моделирования фотонно-кристаллических структур различной размерности [10].

На рис. 3, б горизонтальными пунктирными линиями обозначен диапазон частот, в котором происходит перекрытие запрещенных зон для ТЕ и ТМ поляризаций, т. е. формируется полная запрещенная зона. В этом частотном диапазоне невозможно распространение электромагнитного излучения независимо от направления волнового вектора и вектора поляризации. Следует отметить, что полная запрещенная зона формируется и при увеличении значений относительного радиуса вакуумных цилиндров и диэлектрической проницаемости, однако в этом случае структура теряет механическую прочность из-за уменьшения толщины перемычек между отверстиями.

Представленные результаты расчетов получены в рамках двухмерного приближения, т. е. предполагается распространение волн только в плоскости (x, y) и равенство нулю третьей компоненты волнового числа ($k_z = 0$). Именно в этом случае анализ волновых процессов в периодической системе значительно упрощается благодаря возможности независимого рассмотрения ТЕ и ТМ поляризаций.

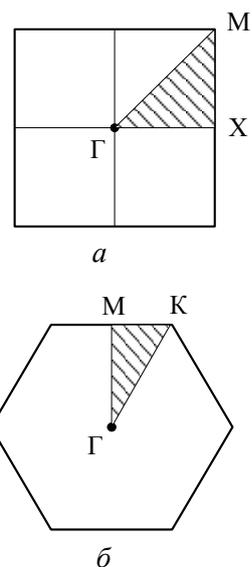


Рис. 2

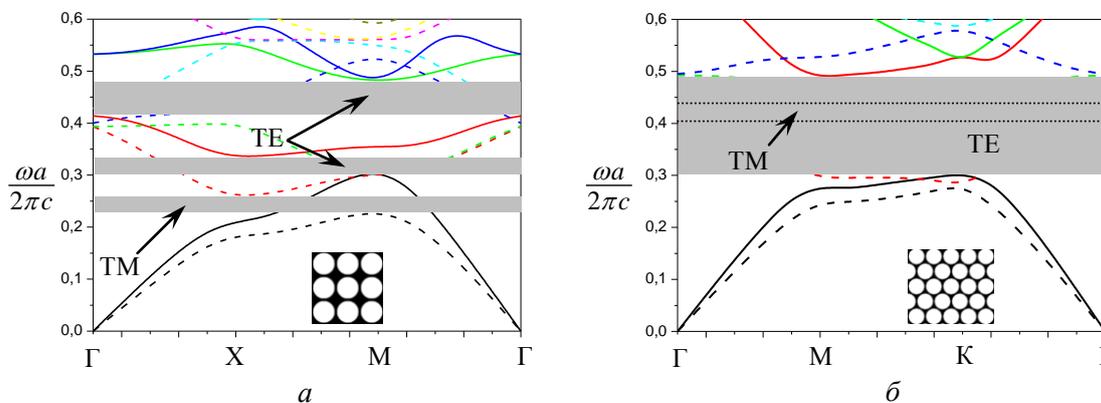


Рис. 3

Полосовые спектральные свойства периодических структур обуславливают возможность создания на их основе различных функциональных устройств для управления электромагнитным излучением. Ключевым моментом в этом плане является существование запрещенных частотных зон в фотонных кристаллах различной размерности. С этим явлением непосредственно связана возможность локализации электромагнитного излучения в тех областях, где нарушена пространственная периодичность структуры. Обычно эти области называются дефектами. Нарушение пространственной периодичности диэлектрической проницаемости усложняет электродинамический анализ из-за отсутствия трансляционной симметрии, по крайней мере, в одном направлении. Тем не менее, в случае дефектов простейшей формы возможно применение стандартного метода плоских волн для определения собственных режимов исследуемой структуры [11].

Волноводы на основе фотонных кристаллов

Простейшим способом формирования волноведущего тракта в бесконечной периодической структуре является создание линейного дефекта за счет изменения физических свойств одного или нескольких смежных рядов элементов. Применительно к рассматриваемым в данной работе структурам это означает, например, изменение диэлектрической проницаемости или диаметра ряда диэлектрических или вакуумных цилиндров. На рис. 4 представлены различные варианты двухмерных фотонно-кристаллических волноводов, основанные на формировании линейного дефекта в периодической системе. Следует отметить, что для реализации взаимодействия волноводных волн с электронными потоками пригодны только пустотелые волноводы, варианты которых изображены на рис. 4, *а, г*. Это означает, что из двух механизмов локализации электромагнитного излучения в волноводном канале здесь используется только один, обусловленный наличием частотной запрещенной зоны.

Определение собственных режимов фотонно-кристаллической структуры с линейным дефектом, соответствующих волноводным волнам, также проводится на основе анализа дисперсионных диаграмм. В отличие от идеальной периодической системы цилиндрических элементов здесь можно ограничиться рассмотрением только того диапазона волновых векторов, который соответствует выбранному продольному направлению волновода. В частности, для волновода в квадратной решетке (рис. 4, *а – в*) собственные режимы системы определяются на интервале (Γ, X) в неприводимой зоне Бриллюэна на рис. 2, *а*.

Эффективное взаимодействие электронного потока, направленного вдоль оси Ox , с электромагнитной волной реализуется при наличии компоненты электрического поля E_x . Поэтому для формирования электродинамической системы необходимо использовать фотонно-кристаллическую структуру, обеспечивающую наличие запрещенных зон для ТЕ поляризации излучения. Пример такой структуры изображен на рис. 4, *г*.

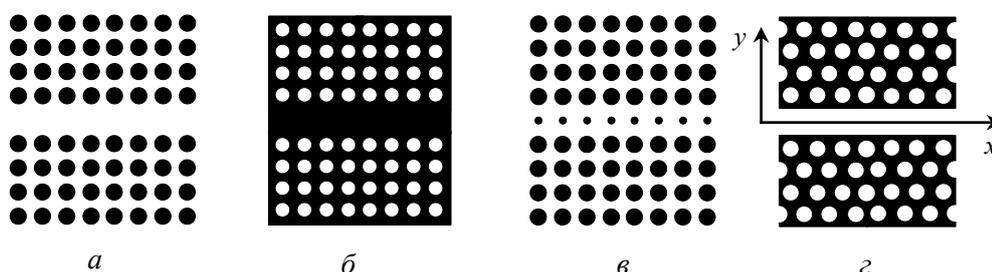


Рис. 4

В данном случае, как и для рис. 4, *а* и *б*, волноводный канал образуется путем удаления одного ряда элементов. Полученный линейный дефект обуславливает появление дисперсионной кривой в пределах запрещенной зоны, характерной для идеального фотонного кристалла. В результате формируется одномодовый волновод. Увеличение ширины канала приводит к нарастанию количества дисперсионных кривых в пределах запрещенной зоны и, соответственно, количества распространяющихся в волноводе мод.

На рис. 5, *а* представлена дисперсионная диаграмма фотонно-кристаллического волновода, полученного после удаления пяти рядов периодической структуры. Стрелкой на дисперсионной диаграмме указана точка с координатами $(0.4, 0.385)$, для которой рассчитано амплитудное распределение компоненты электрического поля E_x , (рис. 5, *б*).

В данном случае реализуется волноводный режим с фазовой скоростью, близкой к скорости света, что позволяет осуществлять электронно-волновое взаимодействие только для ультрарелятивистских потоков заряженных частиц. Важным преимуществом данной электродинамической системы является практически однородное поперечное распределение высокочастотного поля в волноводе, которое приводит к повышению сопротивления связи при пропускании электронных потоков по центру канала.

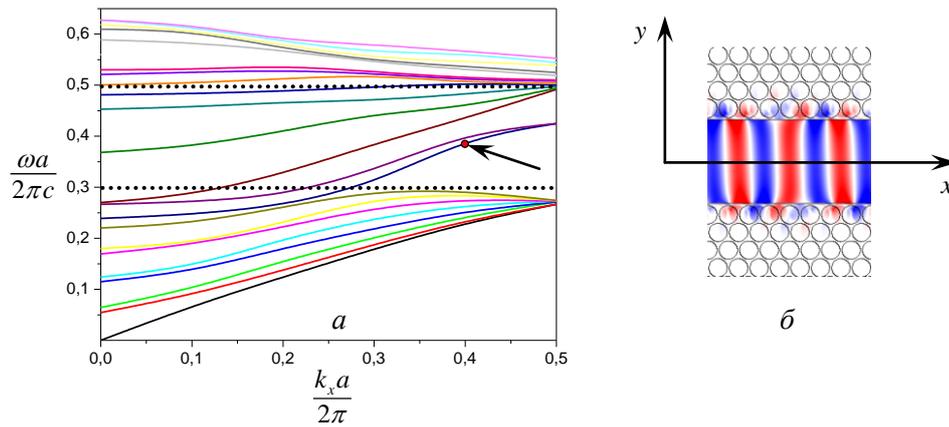


Рис. 5

Одним из возможных вариантов уменьшения фазовой скорости волн в фотонно-кристаллическом волноводе является применение гребенчатых поверхностей на одной или двух его стенках. Такие структуры на основе металлических волноводов с электронными потоками используются для реализации усилителей на прямой и обратной волне [12].

В случае двумерного фотонно-кристаллического волновода гребенчатая поверхность может быть сформирована на его стенках, параллельных образующим цилиндров.

Рассмотрим сначала волновод с одинарной гребенкой на основе прямоугольной решетки вакуумных отверстий в диэлектрике. На рис. 6, а представлены результаты расчета дисперсионных характеристик для ТЕ поляризации излучения. Данная структура имеет две запрещенные зоны, отмеченные на рисунке штриховкой. Дисперсионные кривые, проходящие через запрещенные зоны, соответствуют локализованным в области дефекта периодичности модам. Штриховыми прямыми обозначены так называемые линии света, на которых фазовая скорость распространяющихся в структуре волн равна скорости света в вакууме. Следует отметить, что в данном случае дефект не является линейным и процедура расчета собственных состояний системы значительно усложняется.

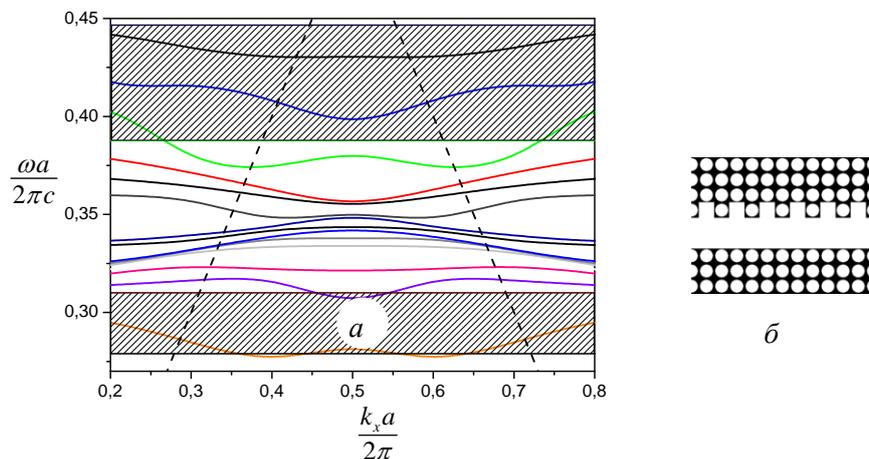


Рис. 6

Волноводные режимы для схемы на рис. 6, б реализуются как в первой (низкочастотной), так и во второй (высокочастотной) запрещенной зоне. Амплитудное распределение компонент электрического поля, рассчитанное для этих двух зон, представлено на рис. 7. Распределения на рис. 7, а и в соответствуют компоненте E_x , на рис. 7, б и г – компоненте E_y . Здесь приведены распределения для мод π -типа, соответствующих значению нормированного волнового числа $\frac{k_x a}{2\pi} = 0.5$. Ось абсцисс проходит в центре волноводного канала. В первой

запрещенной зоне формируется практически антисимметричное (нечетное) распределение поля компоненты E_x со смещенным относительно центра волноводного канала нулем поля и симметричное (четное) распределение для компоненты E_y . Во второй зоне ситуация обратная – симметричным является распределение компоненты E_x , причем максимум напряженности поля реализуется практически на оси симметрии волноводного канала. Этот факт свидетельствует об увеличении сопротивления связи при пропускании электронного потока через волновод рассматриваемой конфигурации. Однако замедление волноводной волны во второй запрещенной зоне меньше, чем в первой. В связи с этим поле на рис. 7, *в* и *г* больше проникает в окружающую волновод периодическую структуру по сравнению с рис. 7, *а* и *б*.

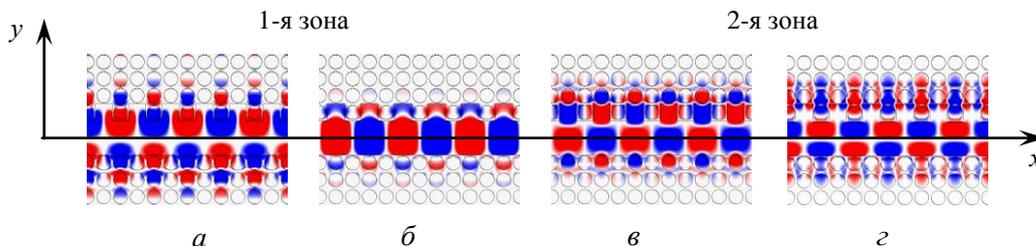


Рис. 7

Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического волновода с двумя гребенчатыми поверхностями незначительно отличается от варианта с одной гребенкой. Симметричная форма дефекта периодической системы также приводит к формированию четных и нечетных мод волновода. На рис. 8 представлены дисперсионные характеристики (рис. 8, *а*) и пространственные распределения компоненты E_x напряженности электрического поля для режимов локализации поля в волноводе с двумя гребенчатыми границами.

Рис. 8, *б*, *в* соответствуют нормированным частотам $\frac{\omega a}{2\pi c} = 0.259$ и 0.402 . Первое распределение формируется вблизи низкочастотной границы первой запрещенной зоны, а второе – в пределах второй запрещенной зоны. Очевидно, что в исследуемом фотонно-кристаллическом волноводе минимальная фазовая скорость волны, соответствующей локализованным модам дефекта, примерно в два раза меньше скорости света. Для дальнейшего уменьшения фазовой скорости необходимо создавать периодические структуры, которые, с одной стороны, характеризуются низкочастотными запрещенными зонами для определенной поляризации излучения, а с другой – имеют локализованные в области дефекта периодичности собственные состояния в пределах этих зон.

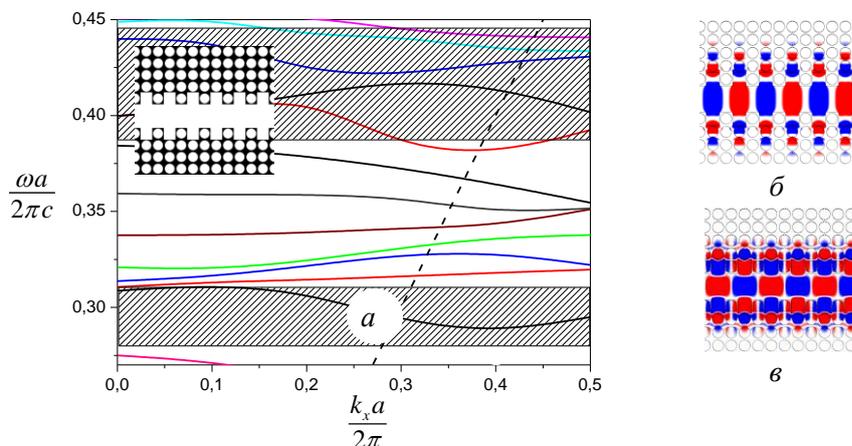


Рис. 8

В данном случае наблюдаются две симметричные моды, причем максимальные значения напряженности компоненты E_x реализуются в областях, примыкающих к канавкам гре-

бенки, а минимумы – напротив ламелей. Аналогичное распределение поля наблюдается для металлической гребенки в непосредственной близости от ее поверхности. Вместе с тем, поперечное амплитудное распределение компоненты E_x в исследуемом волноводе является практически однородным в отличие от двойной металлической гребенки, где для симметричного распределения на продольной оси системы формируется минимум поля [13]. Таким образом, при пропускании электронного потока в пролетном канале фотонно-кристаллического волновода может быть сведено к минимуму высокочастотное расслоение, которое является одним из основных факторов снижения эффективности взаимодействия пучка с поверхностными волнами обычных замедляющих систем.

Выводы

Волноводные структуры на основе линейных дефектов фотонных кристаллов позволяют формировать электродинамические системы для электровакуумных приборов терагерцового диапазона, в которых достигается увеличение сопротивления связи за счет однородного амплитудного распределения поля локализованных собственных состояний системы в области движения электронного потока. Результаты расчетов дисперсионных характеристик свидетельствуют о возможности существенного уменьшения (практически в два раза) фазовой скорости волн в фотонно-кристаллических волноводах с одной и двумя гребенчатыми границами, что позволяет использовать пучки с меньшими значениями ускоряющего напряжения. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности поиска и разработки новых конфигураций замедляющих систем на основе фотонно-кристаллических структур с целью создания эффективных электродинамических систем для электронных приборов терагерцового диапазона малой и средней мощности.

Список литературы: 1. *Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C. et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 84. – pp. 4184–4187. 2. *Sarychev A. K., Shalaev V. M.* *Electrodynamics of Metamaterials.* Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007. – 247 p. 3. *Joannopoulos J. D., Meade R. D., Winn J. N.* *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light.* Princeton Univ. Press, 1995. – 137 p. 4. *Банков С. Е.* *Электромагнитные кристаллы.* – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 352 с. 5. *Kelly J. M., Stenoien J. O., Isbell D. E.* *WaveGuide Measurements in the Microwave Region on Metal Powders Suspended in Paraffin Wax* // *J. Appl. Phys.* – 1953. – Vol. 24, No. 3. – pp. 258 – 262. 6. *Фельд Я. Н., Бененсон Л. С.* *Антенно-фидерные устройства. Ч. 2.* – М. : ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1959. – 551 с. 7. *Хижняк Н. А.* *Интегральные уравнения макроскопической электродинамики.* – Киев : Наук. думка, 1986. – 280 с. 8. *Johnson S. G., Villeneuve P. R., Fan S., Joannopoulos J. D.* *Linear waveguides in photonic-crystal slabs* // *Physical Review B.* – 2000. – Vol. 62, No. 12. – pp. 8212 – 8222. 9. *Cowan B. M.* *Three-dimensional dielectric photonic crystal structures for laser-driven acceleration* // *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams.* – 2008. – Vol. 11. 011301. 10. *Johnson S. G., Joannopoulos J. D.* *Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis* // *Optics Express.* – 2001. – Vol. 8, No. 3. – pp. 173–190. 11. *Skorobogatiy M., Yang J.* *Fundamentals of Photonic Crystal Guiding.* Cambridge University Press, 2009. – 267 p. 12. *Vey B. D., Basten M. A., Booske J. H.* *Analysis of Rectangular Waveguide-Gratings for Amplifier Applications* // *IEEE Trans. on MTT.* – 1994. – Vol. 42, No. 6. – pp. 995–1003. 13. *Силин Р. А., Сазонов В. П.* *Замедляющие системы.* – М. : Сов. радио, 1966. – 632 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 14.11.2013