

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

ВОЛНЫ В ДИАГОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ EBG-ВОЛНОВОДАХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ С КВАДРАТНОЙ СЕТКОЙ

© 2020 г. С. Е. Банков^а, *, В. И. Калиничев^а, Е. В. Фролова^а

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: sbankov@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 14.01.2020 г.

Принята к публикации 29.01.2020 г.

Исследованы EBG-волноводы в электромагнитном кристалле в виде двумерно-периодической решетки металлических цилиндров, расположенных между проводящими экранами. Получены дисперсионные характеристики волноводов, образованных удалением одного, двух и трех рядов цилиндров вдоль диагонали кристалла с квадратной сеткой. В результате анализа частотной дисперсии основных волноводных мод и собственных волн однородного кристалла определены факторы, ограничивающие полосы рабочих частот волноводов, а также получены оптимальные с точки зрения диапазонных свойств параметры решетки. Проведено сравнение характеристик волноводов, ориентированных вдоль диагонали кристаллической решетки, с аналогичными характеристиками волноводов, образованных вдоль главных осей в кристаллах с квадратной сеткой.

DOI: 10.31857/S0033849420090016

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется метаматериалам в виде периодических структур — метакристаллам, или искусственным кристаллам, характеризующимся упорядоченным расположением частиц (элементов) в узлах решетки. Среди метакристаллов наибольшее распространение в оптическом диапазоне получили PBG (photonic bandgap) структуры, или фотонные кристаллы [1, 2], а в микроволновом и СВЧ-диапазонах — EBG (electromagnetic bandgap) структуры, называемые также электромагнитные кристаллы (ЭМК) [3, 4]. Один из видов двумерных ЭМК — периодические структуры, расположенные между двумя металлическими экранами, которые формируют плоский волновод. Создавая дефекты в кристаллах путем удаления определенных элементов из решетки, можно формировать волноводные каналы и на их основе реализовывать широкий спектр функциональных элементов и устройств, таких как волноводные сочленения, изгибы волноводов, делители мощности и т.д. [3–11].

Частотные свойства образованных таким образом волноводных устройств зависят от вида ЭМК и его элементов, типа сетки, образующей узлы решетки, количества рядов удаленных элементов и параметров решетки.

В микроволновом диапазоне для создания EBG-кристаллов широко применяются планарные волноводы в виде металлизированных ди-

электрических подложек с относительно высокими значениями диэлектрической проницаемости [5–9]. Элементами решетки служат металлизированные или неметаллизированные отверстия в подложке. Наиболее подходящей для изготовления таких структур, а также интегрированных с ними возбуждающих микрополосковых линий является печатная технология.

В СВЧ-диапазоне в качестве элементов ЭМК, как правило, используются металлические цилиндры и стержни [4, 10–12], а возбуждение волноводных каналов осуществляется стандартными металлическими волноводами [10, 11].

Для реализации волноводных устройств на основе ЭМК применяются в основном решетки с квадратной [5, 10–12] и треугольной [6–8] сетками, а также их сочетание в одном устройстве [7, 8]. В большинстве опубликованных работ [5–10] рассмотрены волноводы, образованные удалением из решетки ЭМК одного ряда элементов.

При проектировании и выборе диапазона рабочих частот EBG-волноводов в работах [1, 2, 5–9] был использован подход, основанный на анализе дисперсионной диаграммы Бриллюэна однородного EBG-кристалла. Это позволяет определить полосу частот, которая соответствует его запрещенной зоне. Параметры волновода в кристалле выбирают так, чтобы его рабочая полоса находилась внутри этой запрещенной зоны. Дисперсионные характеристики волноводов были исследо-

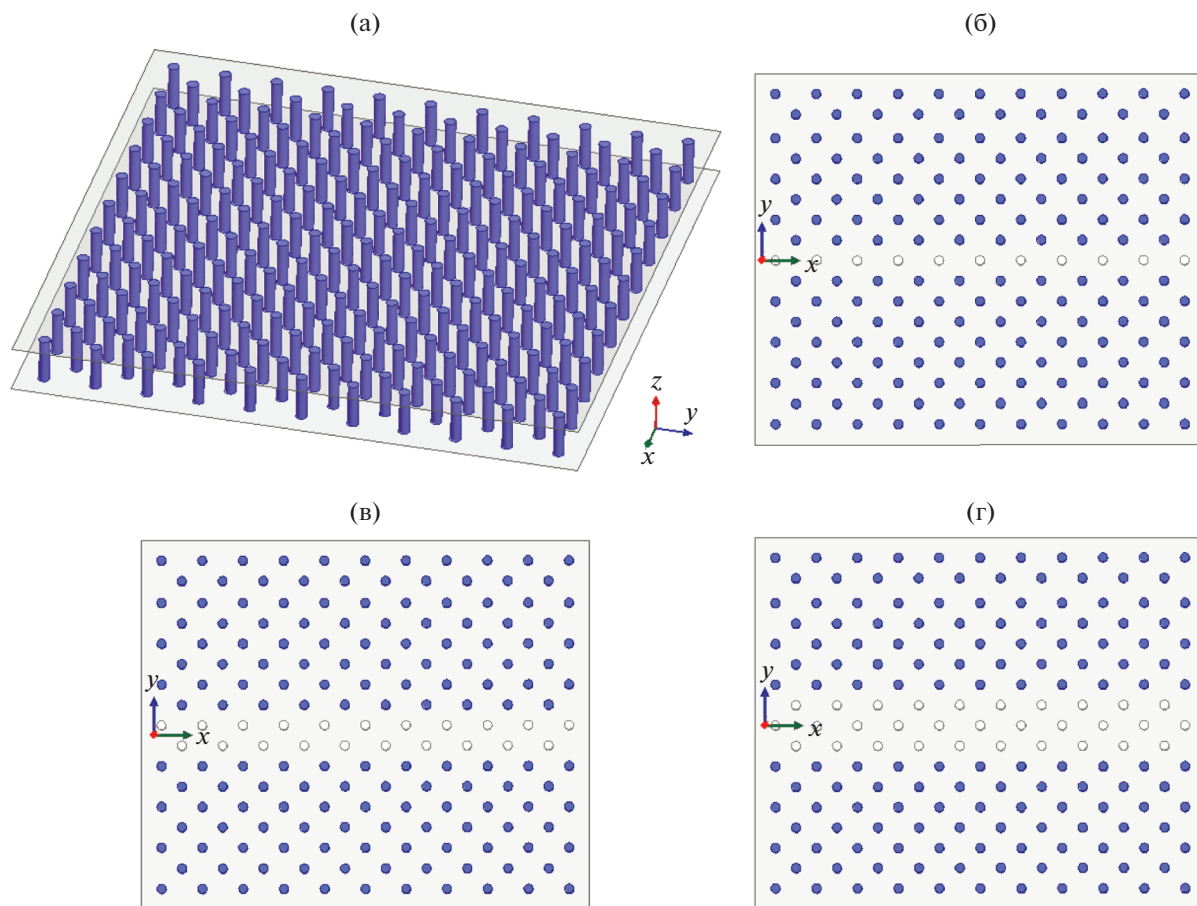


Рис. 1. Однородный ЭМК (а) и EBG-волноводы на его основе: однорядный (б), двухрядный (в), трехрядный (г).

дованы или в режиме собственных волн [12], или в режиме возбуждения [10, 11].

В работе [12] детально исследованы дисперсионные характеристики волноводов в ЭМК в виде решетки металлических цилиндров с квадратной сеткой, образованных удалением одного, двух, трех рядов цилиндров, ориентированных вдоль главных осей кристалла. Проанализированы факторы, ограничивающие одномодовый режим таких волноводов. Показано, что полоса рабочих частот EBG-волноводов может ограничиваться не только нижними критическими частотами однородного кристалла и ближайших волноводных мод, но и нижней границей запрещенной зоны основной волноводной моды, т.е. ее верхней критической частотой, выше которой она перестает распространяться.

Данная работа продолжает исследования, приведенные в [12]. Здесь мы рассматриваем волноводы, ориентированные вдоль диагонали решетки металлических цилиндров с квадратной сеткой. Для анализа частотных свойств волноводов применялся подход, описанный в [4, 12]. При вычислении дисперсионных характеристик волноводных мод и собственных волн однородного кристалла

использовался режим расчета собственных значений и функций в программе ANSYS HFSS (<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>).

Цель работы состоит в том, чтобы на основе анализа дисперсионных характеристик определить факторы, влияющие на диапазон рабочих частот исследуемых волноводов (однорядных, двухрядных, трехрядных), и найти оптимальные параметры решетки, обеспечивающие максимальные полосы одномодового режима работы таких волноводов.

1. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛА И EBG-ВОЛНОВОДОВ

Рассмотрим ЭМК в виде двумерно-периодической решетки металлических цилиндров с квадратной сеткой, заключенных между двумя идеально проводящими экранами (рис. 1а). Введем следующие обозначения: P – период решетки вдоль обеих главных осей кристалла, D – диаметр цилиндров, h – расстояние между экранами и высота цилиндров.

Исследуем волноводы, образованные удалением одного ($M = 1$), двух ($M = 2$) и трех ($M = 3$) рядов цилиндров вдоль диагонали решетки (вдоль оси $0x$ на рис. 1б–1г).

Для получения дисперсионных характеристик волноводных каналов, изображенных на рис. 1б–1г, необходимо в каждом из волноводов выделить ячейку, соответствующую одному периоду волноводного канала в направлении распространения волны (вдоль оси $0x$) и использовать периодические граничные условия на паре противоположных граней ячейки (параллельных плоскости ZY) [12]. Задавая различные сдвиги фазы между гранями на длине периода, можно определить соответствующие им резонансные частоты эквивалентного резонатора, образованного объемом ячейки. Так же как и в [12], для простоты моделирования ограничим волноводную структуру по ширине (вдоль оси $0y$) конечным числом цилиндров и идеально-проводящими боковыми стенками. Модели ячеек однорядного, двухрядного и трехрядного волноводов с продольными размерами $P_w = P\sqrt{2}$ изображены соответственно на рис. 2а–2в. Стенки волноводов в поперечных сечениях в каждой из моделей содержат по два цилиндра. Следует отметить, что в продольном направлении минимальные ячейки волноводов с диагональной ориентацией содержит три ряда цилиндров, в то время как в ячейке волноводов с осевой ориентацией можно ограничиться одним рядом элементов.

2. ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОБСТВЕННЫХ ВОЛН EBG-ВОЛНОВОДОВ

Для вычислений дисперсионных характеристик исследуемых волноводов в качестве примеров были использованы параметры кристаллической решетки: $P = 12$, $D = 6$ ($M = 1$); $P = 8$, $D = 2.5$ ($M = 2$); $P = 6$, $D = 2$ ($M = 3$), $h = 10$, совпадающие с соответствующими параметрами EBG-волноводов, ориентированных вдоль главных осей кристалла с квадратной сеткой, исследованных в [12]. Здесь и далее все геометрические параметры даны в миллиметрах.

При расчетах был задан поиск четырех волноводных мод (четырёх наименьших частот), сдвиг фазы $\Delta\phi$ менялся в интервале $(-\pi, \pi)$. Определение типа волны, соответствующего каждой из найденных резонансных частот, проводилось на основе анализа структуры поля в ячейке волновода и направления вектора Пойнтинга в волноводе. Фазовые постоянные волноводных мод определяли из соотношения $\beta = -\Delta\phi/\bar{P}$, где $\bar{P}$ – период соответствующей волноводной структуры. Для однорядного (см. рис. 2а) и трехрядного волноводов (см. рис. 2в) период волноводной структуры $\bar{P}$ равен периоду ячейки $P_w = P\sqrt{2}$. Особенностью двухрядного волноводного канала (см. рис. 1в, 2б), а

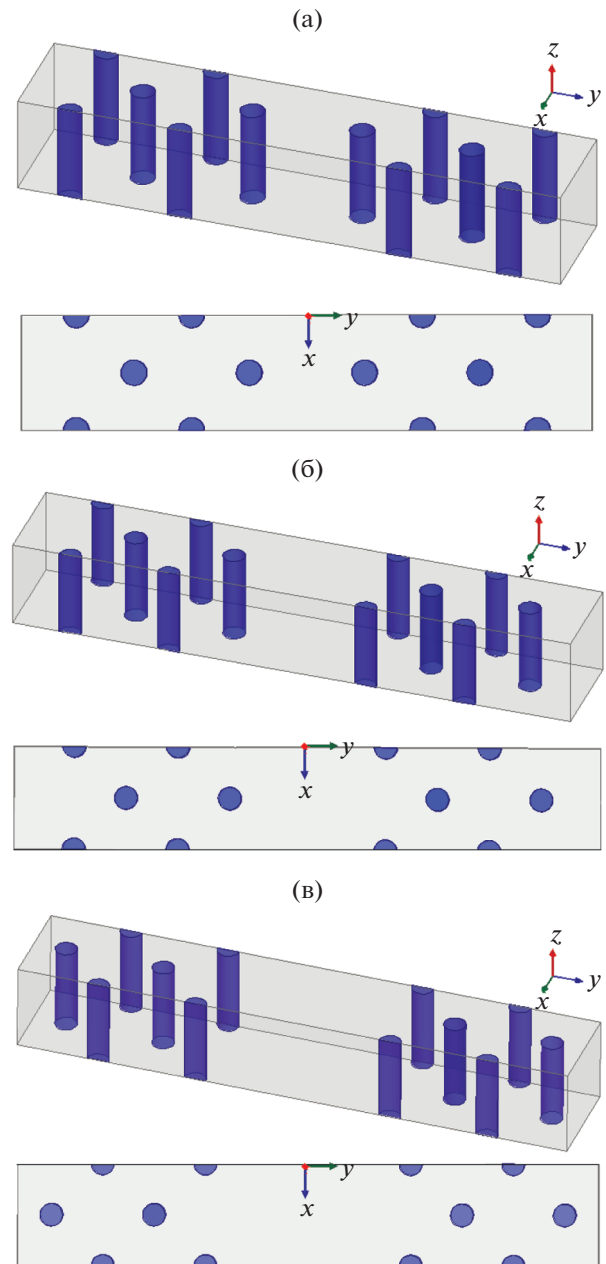


Рис. 2. Единичные ячейки EBG-волноводов: одно-рядного (а), двухрядного (б), трехрядного (в).

также всех волноводов, образующихся удалением четного числа рядов цилиндров вдоль диагонали квадратной сетки, в отличие от однорядного и трехрядного, является отсутствие симметрии боковых стенок волновода относительно продольной плоскости XZ .

Анализ структуры поля в волноводах этого вида показывает, что направление вектора Пойнтинга волны меняется относительно оси волновода на каждом периоде волноводного канала, что сопровождается замедлением волны. В режиме расчета

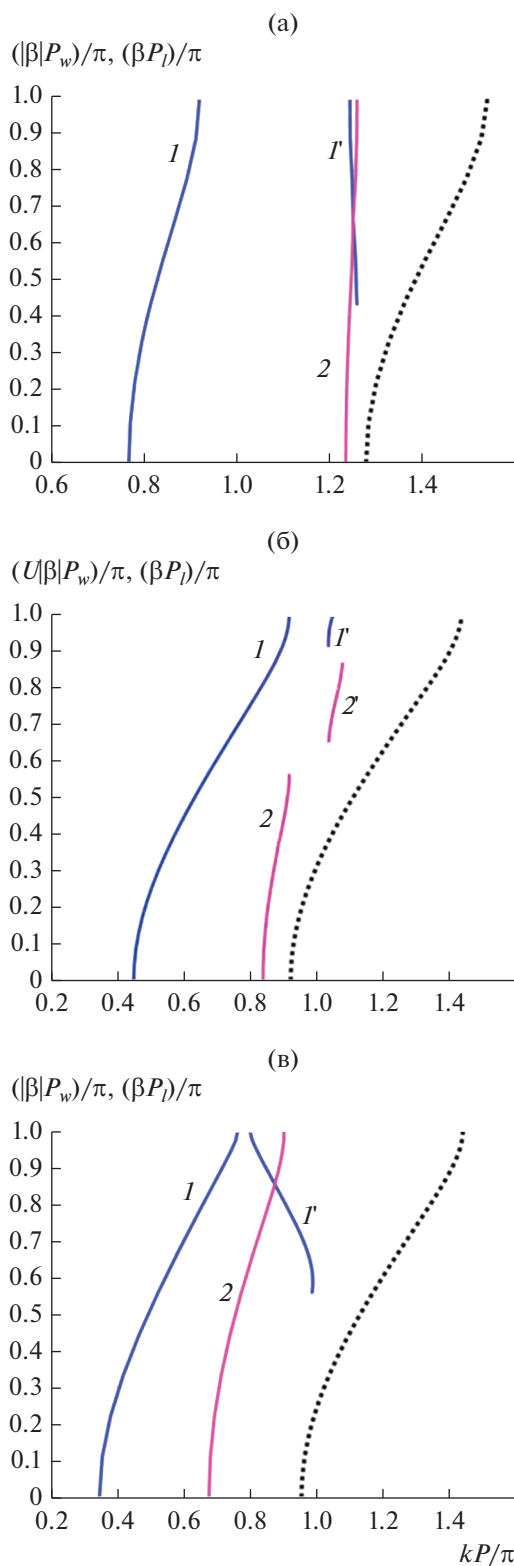


Рис. 3. Дисперсионные характеристики основной моды (I , I'), высшей моды по ширине (2 , $2'$) и собственной волны однородного кристалла (пунктир) — однорядного (а), двухрядного (б), трехрядного волноводов (в). Ветви I , I' и 2 , $2'$ разделены запрещенными зонами.

собственных волн (eigenmode) на границах полосы прозрачности волноводной моды групповая скорость волны должна равняться нулю. Если в однорядном и трехрядном волноводах границам полосы прозрачности соответствуют значения фазового сдвига $\Delta\varphi = 0$ и $\Delta\varphi = \pm\pi$, то в двухрядном волноводе интервал сдвига фазы, соответствующий частотному диапазону существования первой моды волновода, $\Delta\varphi_{\max}$ превышает значение π . В этом случае можно ввести коэффициент U как отношение $\Delta\varphi_{\max}/\pi$, а за период волноводующей структуры следует принять величину $\bar{P} = UP_w$.

Для универсальности дисперсионных характеристик относительно параметра решетки P целесообразно представить частотные зависимости фазовых постоянных в нормированных координатах $kP/\pi - |\beta|\bar{P}/\pi$, где kP/π — безразмерный параметр, пропорциональный частоте (k — волновое число свободного пространства), а $|\beta|\bar{P}/\pi$ — модуль фазовой постоянной, нормированный на период волноводной структуры $\bar{P}$. Для однорядного и трехрядного волноводов период волноводной структуры совпадает с периодом волновода вдоль оси Ox $\bar{P} = P_w = P\sqrt{2}$, для двухрядного — с периодом волны вдоль направления вектора Пойнтинга $\bar{P} = UP_w$.

На рис. 3а–3в представлены рассчитанные нормированные дисперсионные характеристики двух первых мод исследуемых волноводов — основной (кривые I) и высшей по ширине (кривые 2). Как видно из рисунков, дисперсионные характеристики основной моды волноводной моды в исследованном диапазоне частот состоят из двух ветвей (кривые I , I'), разделенных запрещенной зоной, в которой основная волна не распространяется. На частотах, соответствующих границам этой полосы, групповая скорость волны равна нулю. Для двухрядного волновода в рассматриваемом диапазоне частот (см. рис. 3б) кривая 2 , характеризующая дисперсию высшей по ширине типа волны, так же как и кривая I , состоит из двух разделенных запрещенной зоной ветвей (2 и $2'$). Коэффициент замедления в двухрядном волноводе U для данного примера ($P = 8$, $D = 2.5$) равен величине 1.26, а его зависимость от относительного диаметра цилиндра, полученная при расчетах, приведена на рис. 4.

Кроме дисперсионных характеристик первых двух волноводных мод на рис. 3а–3в пунктирной кривой показана частотная дисперсия собственной волны однородной двумерно-периодической решетки с диагональной сеткой в полосе ее прозрачности в координатах $kP/\pi - |\beta|P_l/\pi$, где P_l — период единичной ячейки, соответствующий распространению волны вдоль диагонали ЭМК. Следует отметить, что при расчете дисперсион-

ной характеристики однородного кристалла была выбрана модель ячейки, состоящая из одного цилиндра. Для моделирования распространения волны вдоль диагонали кристалла задавался сдвиг фаз $\Delta\varphi = 0 \dots \pi$ между противоположными гранями ячейки одновременно вдоль обеих осей ($0x$, $0y$), а при нормировке фазовой постоянной использовалась величина периода ячейки кристалла $P_l = P\sqrt{2}/2$.

Анализ представленных на рис. 3 дисперсионных характеристик позволяет определить факторы, ограничивающие полосы частот одномодового режима EBG-волноводов.

Как видно из рис. 3а, для выбранного в данном примере значения $D/P = 0.5$ полоса частот однорядного волновода определяется дисперсионной характеристикой основной моды волновода. Снизу она ограничивается критической частотой, сверху — нижней границей запрещенной зоны для данной моды.

В двухрядном волноводе для обоих типов волн — основного и высшего по ширине — в рассматриваемом диапазоне частот характерно наличие общей запрещенной зоны (см. рис. 3б). При этом нижняя граница запрещенной зоны находится выше критической частоты второй моды, следовательно, для данного значения $D/P = 0.3125$ ($P = 8$, $D = 2.5$) полоса рабочих частот волновода ограничивается сверху критической частотой высшей по ширине моды.

Дисперсионные характеристики трехрядного волновода, изображенные на рис. 3в, имеют вид, аналогичный характеристикам однорядного волновода, при этом запрещенная зона, как и следовало ожидать, сужается. Для заданного отношения $D/P = 1/3$ критическая частота высшей по ширине моды лежит левее нижней границы запрещенной зоны основной моды, следовательно, рабочая полоса частот одномодового режима волновода и в этом случае ограничивается сверху критической частотой высшей по ширине моды EBG-волновода.

Представление дисперсионных характеристик в нормированных координатах позволяет применить полученные результаты к анализу дисперсионных характеристик волноводов в решетке с произвольным значением периода P (при постоянном отношении диаметра цилиндров к периоду решетки D/P).

Для полного описания дисперсионных характеристик с учетом еще одного параметра решетки — диаметра цилиндров D — были рассчитаны зависимости критических частот волноводных мод от величины D/P . Результаты расчетов представлены на рис. 5а–5в в виде семейства кривых в координатах $kP - D/P$, где k — волновое число соответствующей критической частоты.

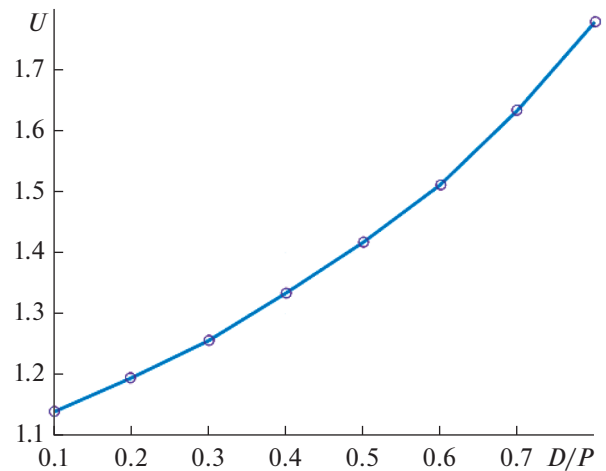


Рис. 4. Зависимость замедления волны в двухрядном волноводе от относительного диаметра цилиндров.

Как видно на рис. 5а, для всех значений $D/P > 0.25$ полоса однорядного волновода ограничивается сверху частотой записывания основной моды (кривая 3), соответствующей нижней границе запрещенной зоны. При этом при увеличении отношения D/P диапазон частот, в котором существует основная волноводная мода, уменьшается. При малых значениях относительного диаметра цилиндров ($D/P < 0.25$) верхняя граница полосы рабочих частот однорядного волновода определяется критической частотой собственной волны однородного кристалла (пунктирная кривая). На этих частотах кристалл “открывается” и стенки волновода становятся прозрачными.

Анализ зависимостей критических частот волноводных мод от относительного диаметра цилиндров D/P в двухрядном волноводе (см. рис. 5б) показывает, что для всех значений параметра $D/P > 0.2$ рабочий диапазон частот двухрядного волноводного канала определяется критическими частотами основного и высшего по ширине типов волн (см. рис. 5б, кривые 1 и 2 соответственно), так как граница запрещенной зоны основной моды лежит выше критической частоты второй моды. При малых значениях относительного диаметра цилиндров ($D/P < 0.2$) полосу частот волновода ограничивает критическая частота собственной волны однородного кристалла (пунктир). С ростом нормированного диаметра цилиндров решетки интервал частот между критической частотой высшей по ширине моды и частотой, на которой основная мода перестает распространяться, уменьшается и стремится к нулю.

В случае трехрядного волновода стенки волноводного канала, как видно из рис. 5в, непрозрачны при любом значении D/P на рассматриваемом интервале значений $0.1 \dots 0.8$ и, следовательно, границы полосы рабочих частот определяются только ос-

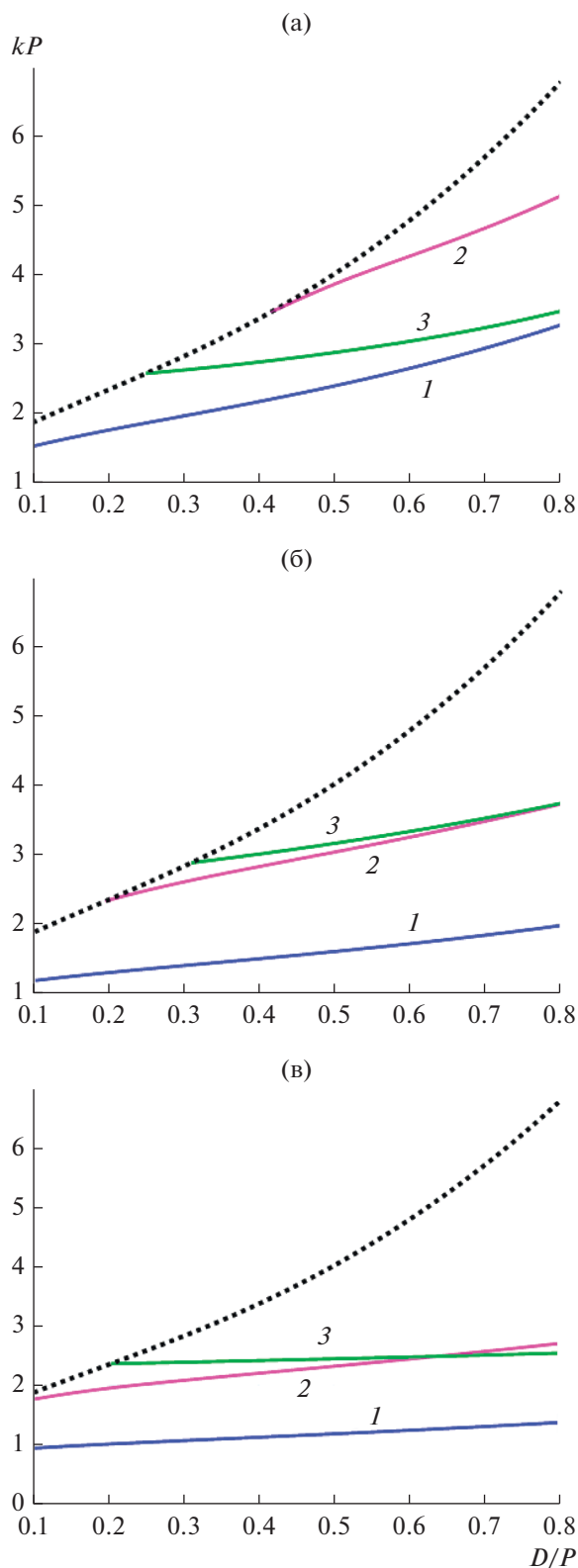


Рис. 5. Зависимости нормированных критических частот волноводных мод f_1 (кривая 1), f_2 (кривая 2), f_{1bg} (кривая 3) и собственной волны однородного кристалла f_l (пунктирная кривая) от относительного диаметра цилиндров в однорядном (а), двухрядном (б) и трехрядном волноводах (в).

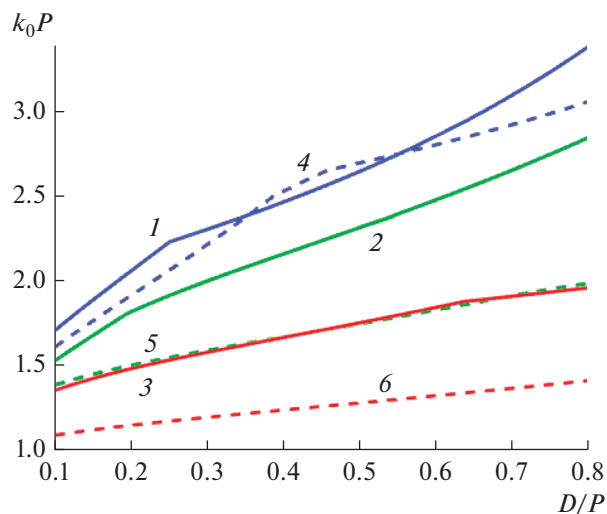


Рис. 6. Зависимости нормированных центральных частот рабочих диапазонов от относительного диаметра цилиндров для волноводов, ориентированных вдоль диагонали (1–3) и вдоль главной оси (4–6) при $M = 1$ (1, 4), 2 (2, 5) и 3 (3, 6).

новой и высшей по ширине модами волновода. На интервале значений $0.2 < D/P < 0.65$ эта полоса ограничивается сверху критической частотой высшей по ширине моды, на интервале $0.65 < D/P < 0.8$ — верхней критической частотой основной моды.

3. РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ВОЛНОВОДОВ

Обобщая данные о критических частотах собственных волн волноводов и однородного кристалла, представленные на рис. 5, получим зависимости центральной частоты и относительной полосы частот рабочего диапазона одномодового режима для каждого типа волноводов от параметров кристаллической решетки P и D/P . Как и в работе [12], определим максимальную $F_{\max}$ и минимальную $F_{\min}$ частоты диапазона рабочих частот: $F_{\min}$ соответствует критической частоте основного типа волны f_1 , а $F_{\max}$ равна минимальной из частот f_2 , f_{1bg} и f_l . На рис. 6 в нормированных координатах $k_0P - D/P$ представлены зависимости волновых чисел k_0 , соответствующих центральным частотам рабочих диапазонов волноводов $f_0 = (F_{\max} + F_{\min})/2$ (сплошные кривые), на рис. 7 — зависимости относительной полосы частот $F_{\max}/F_{\min}$ от величины D/P (также сплошные кривые); на обоих рисунках кривые 1, 2, 3 — для одно-, двух- и трехрядного волноводов.

Как видно из рис. 7, на интервале значений $0.1 < D/P < 0.8$ существуют максимумы относительной полосы рабочих диапазонов волноводов. В частности, для однорядного волновода максимум

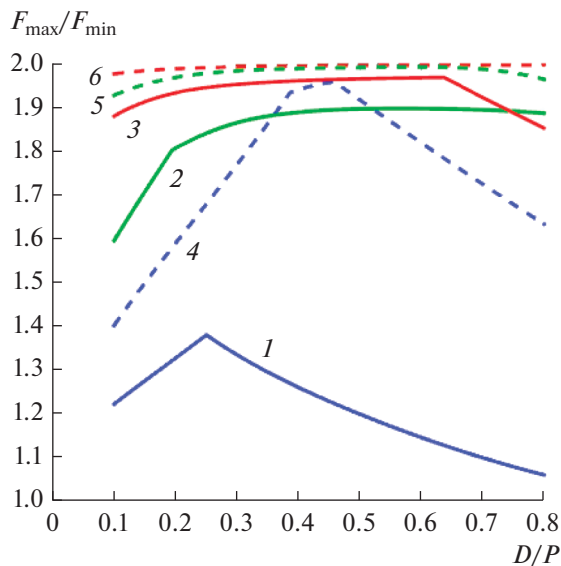


Рис. 7. Зависимости относительной полосы частот $F_{\max}/F_{\min}$ от относительного диаметра цилиндров для волноводов, ориентированных вдоль диагонали (1–3) и вдоль главной оси (4–6) при $M = 1$ (1, 4), 2 (2, 5) и 3 (3, 6).

$F_{\max}/F_{\min} = 1.38$ наблюдается при значении $D/P = 0.25$. Исходя из этой величины определим оптимальные параметры кристаллической решетки для однорядного волновода на центральной частоте диапазона рабочих частот 10 ГГц. В соответствии с рис. 6 при $D/P = 0.25$ величина $k_0P = 2.25$, отсюда следует, что оптимальный период решетки равен $P = 10.63$, а соответствующий диаметр цилиндров $D = 2.67$. Для двух- и трехрядных волноводов максимум достигается при больших значениях относительного диаметра цилиндров.

Представляет интерес сопоставление полученных данных о частотных свойствах EBG-волноводов, ориентированных вдоль диагонали кристаллической решетки, с результатами, приведенными в [12], для волноводов, образованных вдоль главных осей кристалла, с целью оценки возможности использования волноводов этих видов в одной решетке для реализации различных устройств в совмещенной полосе частот. На рис. 6, 7 представлены для сравнения зависимости волновых чисел, соответствующих центральным частотам (см. рис. 6, кривые 4–6), и относительных полос рабочих диапазонов (см. рис. 7) волноводов, ориентированных вдоль главных осей ЭМК. Как видно из рис. 6, центральные частоты рабочих диапазонов волноводов (кривые 3 и 5) практически совпадают на всем интервале значений D/P , следовательно, наилучшими характеристиками обладает объединение двухрядного волновода, ориентированного вдоль главной оси, и трехрядного, образованного удалением цилиндров вдоль диагонали кристалла.

При относительном диаметре цилиндров, например, $D/P = 0.45$, значение k_0P для этих двух типов волноводов равно величине 1.7. Задавая центральную частоту диапазона $f_0 = 10$ ГГц, можно определить параметры общей решетки: период $P = 8.12$ и диаметр цилиндров $D = 3.65$. При этом относительная полоса рабочих частот $F_{\max}/F_{\min}$ определяется меньшей из полос двух волноводов, а именно полосой волновода, ориентированного вдоль диагонали, и равна величине 1.97.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов анализа полученных дисперсионных характеристик EBG-волноводов в решетке металлических цилиндров можно сделать следующие выводы.

1. Полосы рабочих частот волноводов с различной ориентацией в решетке ЭМК с квадратной сеткой (вдоль диагонали и вдоль главных осей) определяются не только нижними критическими частотами собственной волны кристалла и двух волноводных мод (основной и высшей по ширине), а могут также ограничиваться нижней границей запрещенной зоны для основной моды волновода.

2. В однорядных волноводах (как с диагональной, так и с осевой ориентацией) существует оптимальное отношение диаметра цилиндров к периоду решетки, при котором достигается максимум относительной полосы рабочих частот волновода ($D/P = 0.25$ — для диагонального и $D/P = 0.45$ — для осевого волновода). При этом максимальное значение относительной полосы частот однорядного волновода, ориентированного вдоль диагонали квадратной сетки, равно величине 1.38, что значительно меньше величины 1.96 для осевого волновода. При совмещении однорядного осевого и двухрядного диагонального волноводных каналов в решетке с оптимальными параметрами на центральной частоте 10 ГГц ($D = 12.58$, $P = 5.66$) относительная полоса частот снижается от величины 1.96 до 1.38.

3. При использовании осевого и диагонального волноводных каналов в ЭМК с фиксированными параметрами решетки для построения различных СВЧ-устройств (изгибов волноводов, делителей мощности и т.д.) наилучшими характеристиками в совмещенном диапазоне частот обладают осевой двухрядный и диагональный трехрядный волноводные каналы. Так, например, в решетке с квадратной сеткой с оптимальными параметрами $P = 8.12$, $D = 3.65$ ($D/P = 0.45$) совмещенный диапазон рабочих частот этих волноводов на центральной частоте 10 ГГц характеризуется значением относительной полосы частот 1.97.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton: Princeton Univ. Press, 2008.
2. *Sakoda K.* Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
3. *Rahmat-Samii Y., Mosallaei H.* // 11th Intern. Conf. on Antennas and Propagation, Manchester, 17–20 April 2001. P. 560.
4. *Банков С.Е.* Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
5. *Gonzalo R., Ederra I., Martínez B., De Maagt P.* // Electronic Lett. 2005. V. 41. № 7. P. 421.
6. *Abdo Y.S.E., Chaharmir M.R., Shaker J., Antar Y.M.M.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2010. V. 9. № 3. P. 167.
7. *Abdo Y.S.E., Chaharmir M.R., Shaker J., Antar Y.M.M.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2010. V. 9. № 10. P. 1002.
8. *Grine F., Djerafi T., Benhabiles M.T., Riabi M.L.* // IEEE Radio and Wireless Symp. (RWS). Orlando, 20–23 Jan. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 8714324.
9. *Ebrahimpouri M., Quevedo-Teruel O., Rajo-Iglesias E.* // Proc. 11th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Paris, 19–24 Mar. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 1658.
10. *Bankov S., Duplenkova M., Kaloshin V.* // Proc. 13th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Kyiv, 6–8 Sept. 2010. N.Y.: IEEE, 2010. P. 5611359.
11. *Akhiyarov V.V.* // Proc. 23rd Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology”. Sevastopol, 8–14 Sept. 2013. N.Y.: IEEE, 2013. P. 760.
12. *Банков С.Е., Калиничев В.И. Фролова Е.В.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 9. С. 852.