
**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 621.396.67

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ВОЛН
ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ЕМКОСТНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВ В ПОЛОСАХ ПРОЗРАЧНОСТИ**© 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 08.05.2019 г.

После доработки 08.05.2019 г.

Принята к публикации 29.05.2019 г.

Исследованы собственные волны электромагнитного кристалла в виде двумерно-периодической решетки металлических цилиндров с емкостными зазорами, расположенными между двумя металлическими экранами, образующими плоский волновод. При помощи стандартной системы электродинамического моделирования изучены в режиме собственных колебаний дисперсионные характеристики собственных волн, распространяющихся в структуре в первой и второй полосах прозрачности. В режиме возбуждения плоскими волнами исследованы характеристики бесконечного по одной координате слоя электромагнитного кристалла в полосах его прозрачности. Показано, что основная собственная волна структуры в первой полосе прозрачности является медленной волной, коэффициент замедления которой растет на границе первой запрещенной зоны. Установлено, что во второй полосе прозрачности при определенных условиях могут возникать обратные волны, имеющие аномальную частотную дисперсию постоянной распространения. Показана связь условий возникновения обратных волн с частотой последовательного резонанса емкостного цилиндра.

DOI: 10.31857/S0033849420060054

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Фотонные и электромагнитные кристаллы (ФК и ЭМК) были предложены и начали изучаться достаточно давно [1–3]. Интерес к ним во многом был обусловлен возможностью создания в них волноведущих каналов за счет формирования дефектов кристаллической решетки [4–6]. Таким образом, дефекты специальным образом введенные в ФК и ЭМК стали инструментом для создания нового класса волноводных устройств в оптическом и СВЧ-диапазонах. Опыт исследований и разработок показал, что функциональные возможности устройств на основе искусственных кристаллических сред весьма велики и их дальнейшее развитие является актуальной задачей.

Одним из направлений развития схемотехники ЭМК послужила идея, изложенная в работах [7, 8] и обобщенная в книге [9]. В них была предложена концепция управляемого ЭМК. Отличительной чертой концепции представленной в работах [7, 8] является то, что управление осуществляется для каждой частицы ЭМК независимо. Таким образом, появляется возможность формирования в ЭМК за счет управляющих воздействий специально организованных дефектов, которые могут выполнять функции различных устройств, образующих в совокупности функционально законченную схему.

Как видим, применение ЭМК с данным типом управления открывает возможность для создания нового типа СВЧ-устройств – устройств с управляемой структурой. Сам управляемый ЭМК становится при этом универсальной волноведущей средой, которая в зависимости от комбинации управляющих воздействий может выполнять разные функции, типичные для СВЧ-схем: распределения энергии, частотной фильтрации, формирования заданного распределения поля и т.д. Для того чтобы отличать ЭМК с индивидуальным управлением частицами, в работе [10] предложен термин ЭМК-трансформер, который отражает отмеченную выше возможность изменения структурных характеристик среды, а не только ее усредненных параметров.

Хорошие перспективы с точки зрения создания функциональных узлов имеют ЭМК на основе плоского волновода (ПВ), который образуют два идеально проводящих металлических экрана. Возможность достижения в них достаточно высоких характеристик показана в работах [11, 12], в которых представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования различных элементов на основе ЭМК в виде двумерно-периодической решетки металлических цилиндров, расположенных внутри ПВ. В качестве фактора, формирующего дефекты в ЭМК, в указанных работах был использован радиус ци-

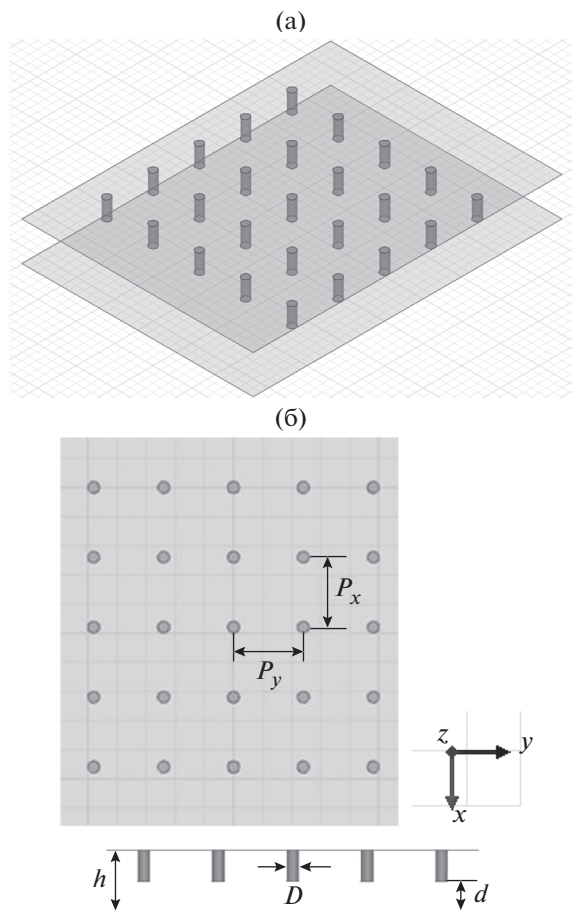


Рис. 1. Исследуемая двумерно-периодическая решетка: трехмерный вид (а), вид сверху и сбоку (б), D — диаметр стержней, P — период решетки, одинаковый в направлениях обеих осей координат $0x$ и $0y$ ($P_x = P_y$), h — расстояние между экранами, d — зазор между торцами стержней и нижним экраном.

линдра. Нетрудно увидеть, что как фактор управления этот параметр неудобен, поскольку ни механически, ни тем более электрически так изменить радиус цилиндра невозможно.

Лучшие перспективы имеют так называемые емкостные цилиндры, к числу которых относятся цилиндры с зазором, коаксиальные цилиндры и цилиндры с сосредоточенными емкостями. Такие цилиндры имеют электрический контакт только с одним из экранов ПВ. От другого экрана их отделяет зазор, который играет роль емкости. Конструктивно емкость может быть выполнена разными способами. Наиболее простым является емкость, образующаяся между торцом цилиндра и экраном. Нетрудно увидеть, что механическое изменение глубины погружения цилиндра в ПВ или электрическое изменение управляемой емкости сосредоточенного конденсатора может осуществляться без разрушения ЭМК только за счет изменения управляющих факторов, поэтому ЭМК с емкостными цилиндрами в значительно большей степени подходят для создания ЭМК — трансформеров.

В работе [10] представлены результаты исследования характеристик ЭМК из цилиндров с зазорами. Основное внимание уделялось изучению поведения структуры в полосе запираания.

Данная работа продолжает изучение ЭМК на основе емкостных цилиндров. В ней основное внимание уделяется исследованию собственных волн, распространяющихся в ЭМК в полосах прозрачности. При этом решаются следующие задачи:

- исследуются дисперсионные характеристики собственных волн в первой полосе прозрачности;
- исследуется возбуждение собственных волн в слое ЭМК, функционирующего в первой полосе прозрачности;
- изучаются дисперсионные характеристики собственных волн во второй полосе прозрачности;
- определяются условия возникновения обратных собственных волн и исследуется их связь с последовательным резонансом емкостного цилиндра;
- исследуется возбуждение собственных волн в слое ЭМК, функционирующего во второй полосе прозрачности.

Основным методом исследования, принятым в данной работе, является электродинамическое моделирование, которое мы проводили в системе High Frequency System Simulator (HFSS) [13] методом конечных элементов. При этом система моделирования используется в двух режимах: стандартном режиме, при котором в структуре имеются источники возбуждения в виде портов, и в режиме собственных волн (eigenmode), при котором источники возбуждения отсутствуют, а система рассчитывает резонансные частоты заданной пользователем структуры. В работе развита методика, связывающая резонансные частоты, рассчитанные в режиме eigenmode, с постоянными распространения собственных волн ЭМК. Ранее аналогичный метод применялся для исследования дисперсионных диаграмм вытекающих волн в волноводно-щелевых антенных решетках бегущей волны [14].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОЛОС ПРОЗРАЧНОСТИ ДВУМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Рассмотрим двумерно-периодическую решетку с прямоугольной сеткой из идеально-проводящих цилиндров (стержней), которые помещены в область между двумя идеально-проводящими экранами (рис. 1), образующими ПВ. Диаметр стержней обозначим через D , период решетки одинаковый в направлениях обеих осей координат $0x$ и $0y$ ($P_x = P_y$), через P , расстояние между экранами через h . С верхним экраном стержни имеют электрический контакт. Зазор между торцами стержней и нижним экраном обозначим через d .

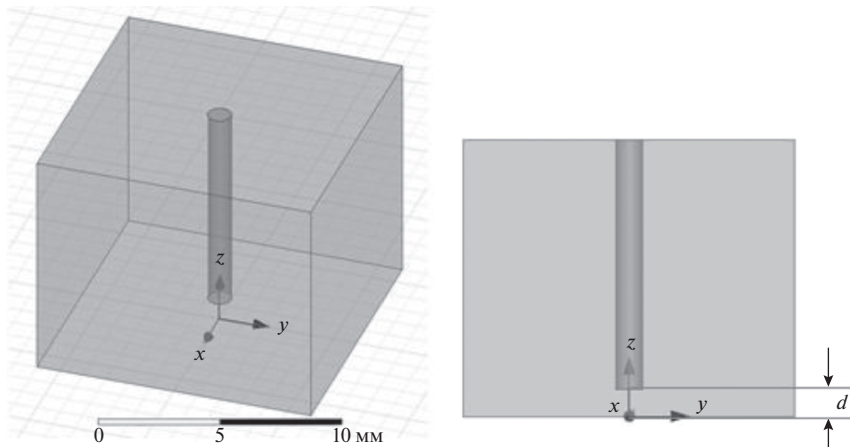
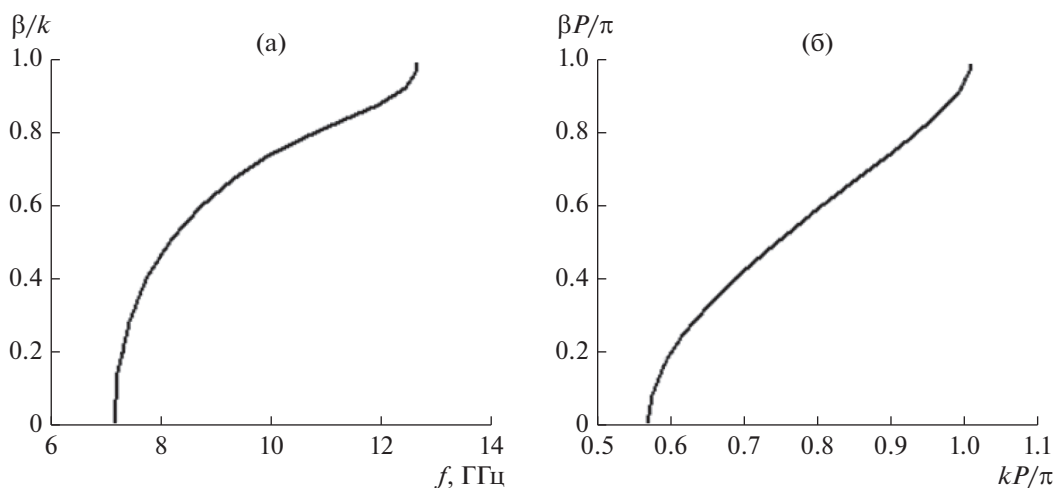


Рис. 2. Модель единичной ячейки.

Рис. 3. Дисперсионная диаграмма в полосе прозрачности решетки стержней с $d = 0$: а – в координатах $\beta/k - f$, б – в нормированных координатах $\beta P - kP$.

Для расчета дисперсионных характеристик волн в данной структуре воспользуемся программой расчета собственных значений, основанной на методе конечных элементов в программе HFSS. Для этого выделяем единичную ячейку (один период) структуры и используем периодические граничные условия на двух парах граней в направлениях $0x$ и $0y$, а также условие идеальной проводимости на экранах, ограничивающих структуру вдоль оси $0z$ (рис. 2).

В первую очередь исследуем случай распространения волны вдоль одной из осей, например вдоль оси $0x$. Задавая в граничных условиях тот или иной сдвиг фазы на длине периода вдоль этой оси, можем рассчитать соответствующие резонансные частоты эквивалентного резонатора, образованного объемом ячейки [15]. Из всего спектра резонансных частот здесь нас интересуют две низшие частоты, соответствующие первой и второй полосам прозрачности рассматриваемой периодической структуры. В общем случае при учете тепловых потерь собственные частоты комплекс-

ные. В данной модели идеально проводящих стержней и экранов – частоты действительные.

Сначала рассмотрим решетку с относительно тонкими стержнями диаметром $D = 1$, периодом $P = 12$ и высотой $h = 10$, с величиной глубины погружения d в качестве переменного параметра. Случай тонких стержней представляет интерес потому, что, как было показано в [10], для них частоты последовательного резонанса при изменении величины зазора от 1 до 5 мм лежат в интересующем нас частотном диапазоне. Исследование дисперсионных характеристик волн в бесконечных двумерно-периодических решетках позволяет лучше понять и объяснить характеристики рассеяния волн в конечно-периодических структурах. Для начала рассчитаем дисперсию волн в решетке с полным погружением стержней ($d = 0$). В диапазоне частот от 0...15 ГГц (15 ГГц – критическая частота ближайшего высшего по высоте типа волны плоского волновода высотой 10 мм) для нее имеется одна полоса пропускания. На рис. 3 представлен участок дисперсионной диаграммы,

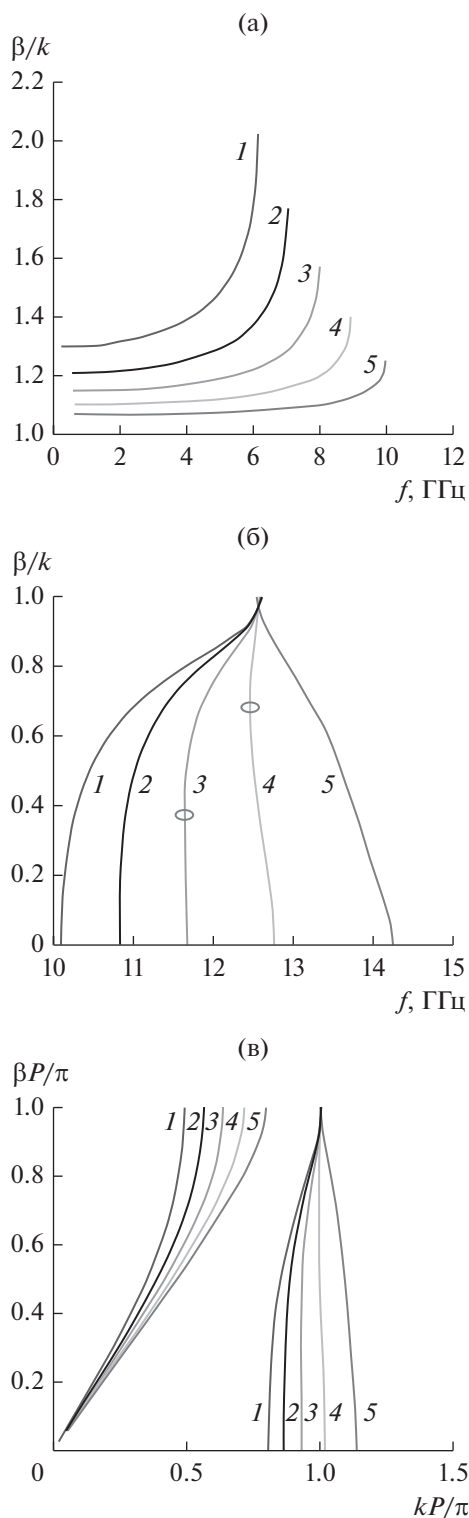


Рис. 4. Дисперсионные диаграммы для волн в решетке тонких стержней ($D = 1$) в первой (а) и во второй (б) полосах прозрачности для величин зазоров $d = 1, 2, 3, 4, 5$ (кривые 1–5 соответственно), а также в обеих полосах прозрачности (в) в координатах $\beta P - kP$.

который соответствует величинам фазового сдвига на периоде от 0° до 180° . Соответствующие им частоты заключены в полосу примерно от 7 до 12.5 ГГц. Как видно из рис. 3а, волна в этой полосе прозрачности является ускоренной ($\beta < k$).

В данной работе основной интерес представляют дисперсионные диаграммы для решетки частично погруженных стержней. На рис. 4 представлены рассчитанные диаграммы для величин зазоров в интервале $d = 1 \dots 5$.

В отличие от рассмотренного выше случая нулевого зазора в решетке частично погруженных стержней имеется дополнительная полоса пропускания в области нижних частот. Таким образом, в диапазоне частот до 15 ГГц решетка из стержней с зазорами имеет две полосы прозрачности: первую полосу в области нижних частот и вторую полосу на более высоких частотах. В полосе частот между ними располагается полоса непрозрачности, в которой распространение отсутствует. Волна в первой полосе прозрачности является замедленной ($\beta > k$), а во второй полосе – ускоренной ($\beta < k$). Интересно отметить, что с ростом величины зазора характер дисперсии в первой полосе прозрачности не меняется. В то же время во второй полосе с ростом величины зазора дисперсия становится аномальной, при которой фазовая и групповая скорости волны противоположно направлены. Следует также отметить, что дисперсионные кривые во второй полосе пропускания сходятся практически в одну точку $kP = \pi$, которая при периоде $P = 12$ мм соответствует частоте 12.5 ГГц. Такой характер зависимостей с выраженной точкой пересечения, вероятно, является свойством решетки тонких стержней. Расчеты показывают, что в случае более толстых стержней волны во второй полосе прозрачности этим свойством не обладают. В качестве примера на рис. 5 представлены дисперсионные диаграммы для решетки стержней с диаметром $D = 4$.

Следует отметить более подробно важные особенности распространения собственных волн решетки во второй полосе прозрачности. Их можно наблюдать в случае тонких стержней (см. рис. 4б). Однако, еще очевиднее они проявляются с ростом диаметра цилиндров (см. рис. 5а). Динамика изменения дисперсионных кривых проявляется при изменении величины зазора d . При совсем малых зазорах дисперсионные кривые во второй полосе пропускания имеют положительную производную, характерную для быстрых волноводных волн. Однако при увеличении параметра d на некоторой частоте производная от постоянной распространения увеличивается и при определенном значении зазора уходит в бесконечность (групповая скорость на этих частотах обращается в нуль). На дисперсионных диаграммах на рис. 4б и 5а соответствующие точки обозначены кружками овальной формы.

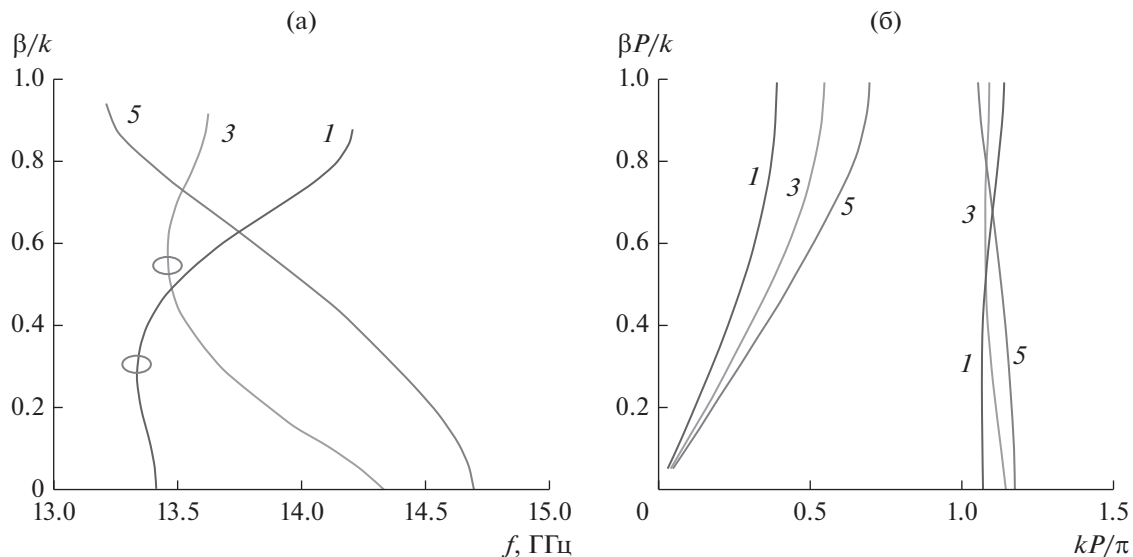


Рис. 5. Дисперсионные диаграммы для волн в решетке толстых стержней ($D = 4$) в первой и во второй полосах прозрачности (а) для $d = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и в обеих полосах прозрачности (в), в координатах $\beta P - kP$.

Совокупность параметров, при которой производная по частоте от постоянной распространения стремится к бесконечности, можно рассматривать в качестве критических условий, так как далее при увеличении зазора или увеличении частоты дисперсионная кривая приобретает две ветви: одна имеет положительную производную по частоте, а другая — отрицательную. Таким образом, видно, что одной частоте соответствуют одновременно два решения дисперсионного уравнения или две собственные волны (см. кривые 1, 3 на рис. 5а). Следовательно, критические условия, о которых мы говорили выше, являются условиями возникновения в решетке волны с аномальной дисперсией, которой соответствует отрицательная производная по частоте. Волна с аномальной дисперсией является обратной волной, так как ее вектор Пойнтинга и волновой вектор направлены в противоположные стороны. При дальнейшем увеличении зазора d диапазон частот, в котором одновременно существуют две волны, исчезает и в решетке распространяется одна обратная волна (кривая 5 на рис. 5а).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ В РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для дальнейшего исследования свойств ЭМК в полосах прозрачности было проведено моделирование решетки в режиме рассеяния плоской волны. В качестве модели для исследования была выбрана конечно-периодическая решетка: периодическая (бесконечная) вдоль оси Oy и конечная, содержащая десять рядов стержней, вдоль

оси Ox . Фрагмент решетки из десяти стержней изображен на рис. 6. Пусть на решетку набежит T -волна ПВ. При расчетах будем использовать стандартный метод электродинамического моделирования [13]. Периодичность решетки вдоль оси Oy обеспечивается периодическими граничными условиями на двух вертикальных гранях воздушного бокса, перпендикулярных оси Oy .

Были рассчитаны частотные зависимости коэффициента передачи при возбуждении волной, распространяющейся вдоль оси Ox , в диапазонах частот, которые соответствуют полосам прозрачности в приведенных в разд. 1 дисперсионных диаграммах. При моделировании были заданы те же, что и при расчетах дисперсионных характеристик, параметры ПВ и цилиндров: $h = 10$, $P = 12$, $D = 1$.

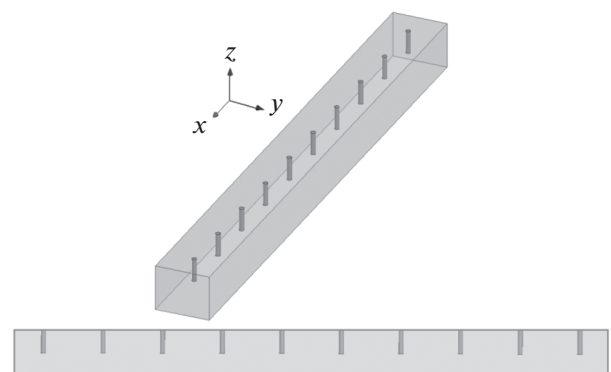


Рис. 6. Модель решетки в задаче рассеяния T -волны: вид сверху (а) и спереди (б).

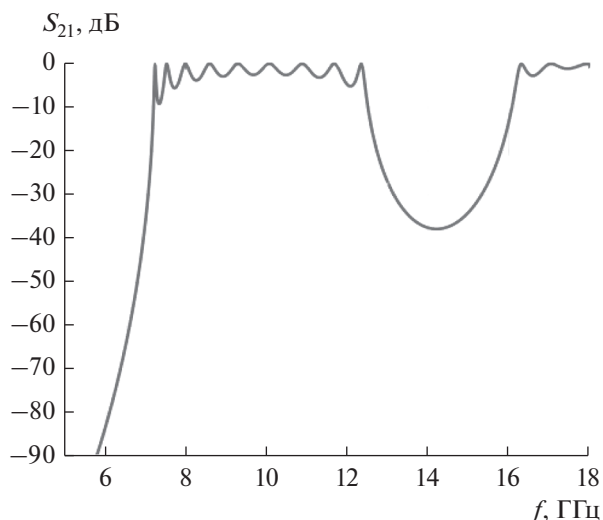


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента передачи решетки цилиндров без зазоров ($d = 0$).

Как и ранее, рассмотрим сначала цилиндры с полным погружением в ПВ ($d = 0$). Частотная зависимость коэффициента передачи решетки для этого случая приведена на рис. 7. Видим, что коэффициент передачи близок к единице в полосе частот 7...12.5 ГГц. Как следует из дисперсионной диаграммы на рис. 3, эта полоса является полосой прозрачности для данной решетки. При расчете дисперсионной диаграммы отмечалось, что в решетке полностью погруженных стержней первая полоса прозрачности в области более низких частот (при $f < 7$ ГГц) отсутствует. Это же подтверждается расчетом коэффициента передачи T -волны.

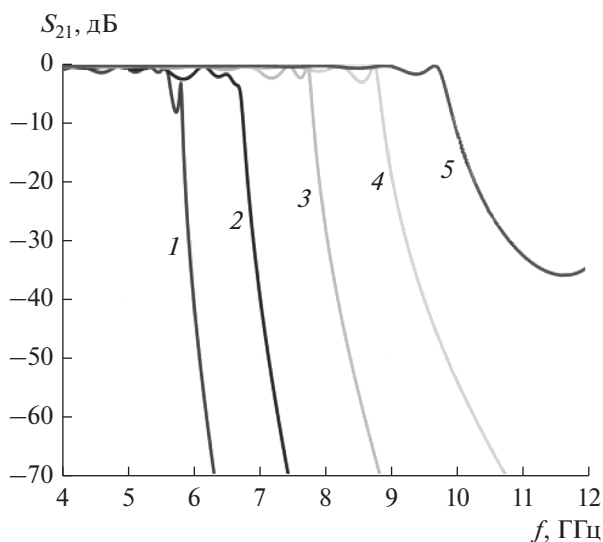


Рис. 8. Коэффициенты передачи в первой полосе прозрачности при $d = 1, 2, 3, 4, 5$ (кривые 1–5 соответственно).

Как показал проведенный выше анализ дисперсионных характеристик, в ЭМК с частично погруженными цилиндрами в рассматриваемой полосе частот существуют две полосы прозрачности: первая — в области низких частот, вторая — области более высоких частот (см. рис. 4). На рис. 8 представлены частотные зависимости коэффициента передачи для решетки цилиндров с зазорами $d = 1, 2, 3, 4, 5$ в диапазоне частот первой полосы прозрачности. Видно, что полоса прозрачности увеличивается с ростом величины зазоров, при этом значения граничных частот полосы прозрачности при изменении глубины погружения цилиндров хорошо согласуются с дисперсионными характеристиками, приведенными на рис. 4а.

На рис. 9, 10 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМК с зазорами во второй полосе прозрачности вблизи частоты 12.5 ГГц. Кривые на рис. 9 имеют полосу прохождение слева от частоты 12.5 ГГц, а на рис. 10 — справа. Такой характер частотных зависимостей S_{21} полностью согласуется с полученными дисперсионными диаграммами в решетках стержней с зазорами (см. рис. 4) и может быть объяснен на основе теории периодических структур (см. ниже).

Полученные выше результаты позволяют построить зависимости граничных частот первой и второй полос прозрачности от величины зазоров (рис. 11). Интересно отметить, что граничные частоты в рассмотренных полосах прозрачности практически линейно увеличиваются с ростом величины зазора.

Отмеченная выше смена положения полосы прозрачности может быть описана в рамках теории периодических структур в виде СВЧ-много-

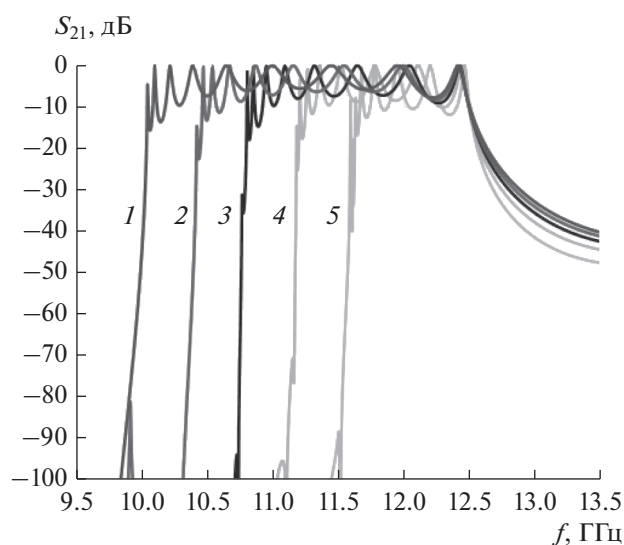


Рис. 9. Коэффициенты передачи во второй полосе прозрачности для решеток с малыми зазорами: $d = 1.0$ (1), 1.5 (2), 2.0 (3), 2.5 (4), 3.0 (5).

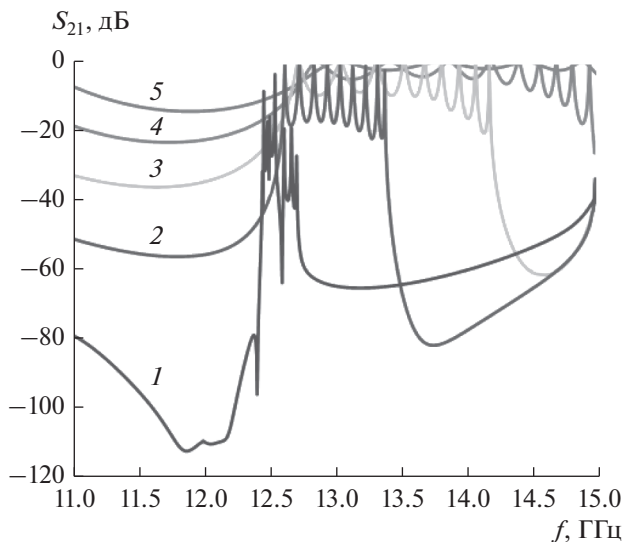


Рис. 10. Коэффициенты передачи во второй полосе прозрачности для решеток с большими зазорами: $d = 4.0$ (1), 4.5 (2), 5.0 (3), 5.5 (4), 6.0 (5).

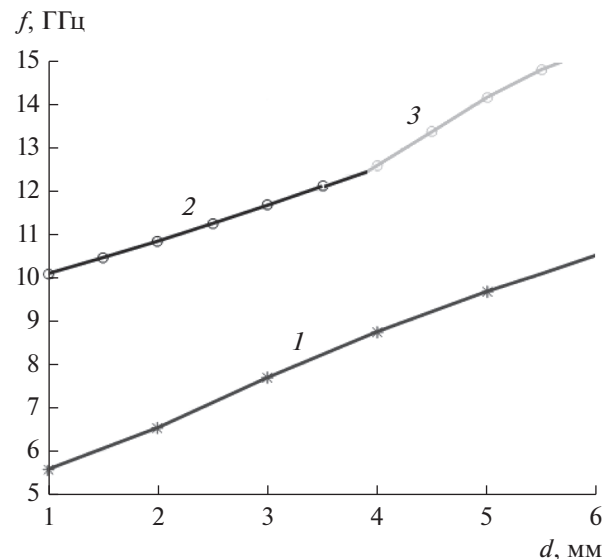


Рис. 11. Зависимости граничных частот от величины зазоров для первой (1) и второй полосы прозрачности решетки слева (2) и справа (3) от частоты 12.5 ГГц.

полосников, включенных в линию передачи [16]. В книге [16] рассматривается периодическая структура, образованная параллельными проводимостями, расположенными в линии передачи с периодом P . Отмечаются следующие особенности распространения собственных волн в такой структуре. Одна из границ второй полосы прозрачности всегда определяется условием $\gamma P = \pi$, где γ – постоянная распространения волны линии. Однако для емкостной проводимости вторая полоса прозрачности расположена выше частоты, определяемой указанным условием, а для индуктивной проводимости – ниже нее. В нашем случае роль волны линии передачи выполняет T -волна ПВ, у которой постоянная распространения равна волновому числу свободного пространства k . Так как в рассматриваемом примере $P = 12$ мм, то характерная частота, относительно которой происходит смена положения полосы прозрачности, равна 12.5 ГГц, что совпадает с приведенными выше результатами численных экспериментов.

Из рис. 9, 10 следует, что при относительно малых зазорах полоса прозрачности расположена ниже частоты 12.5 ГГц, а при больших зазорах – выше нее. В то же время в работе [10] было показано, что электродинамические свойства емкостного цилиндра в определенном диапазоне частот близки к свойствам последовательного контура, параллельно включенного в линию передачи. Роль емкости выполняет зазор между цилиндром и экраном ПВ, а роль индуктивности сам металлический цилиндр.

На частотах ниже частоты последовательного резонанса сопротивление контура имеет емкост-

ной характер, а на высоких частотах характер импеданса становится индуктивным. Изменяя глубину погружения цилиндра в ПВ, мы изменяем его резонансную частоту. Причем увеличение зазора приводит к уменьшению емкости и росту резонансной частоты. Предположим, что при изменении параметра d резонансная частота контура пересекает границу, определяемую условием $\gamma P = \pi$ и соответствующей частотой 12.5 ГГц. Тогда можем сделать вывод, что при относительно малых зазорах сопротивление цилиндра на частоте 12.5 ГГц имеет индуктивный характер, а при относительно больших зазорах он становится емкостным. Следовательно, в соответствии с теорией периодических структур СВЧ [16] полоса прозрачности в первом случае должна лежать ниже частоты 12.5 ГГц, а во втором – выше нее. Поведение полосы прозрачности, описываемое в рамках предложенной концепции, полностью совпадает с представленными выше численными результатами.

Одним из следствий данной физической картины является то, что при величине зазора $d \approx 3.8$, когда полоса прозрачности меняет свое положение относительно частоты 12.5 ГГц, резонансная частота емкостного цилиндра в составе ЭМК должна совпадать с 12.5 ГГц, что и подтверждается соответствующим расчетом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с практической точки зрения наибольший интерес представляет переход ЭМК от одного крайнего состояния в другое. Такими предельными состояниями являются ЭМК с полностью погруженными (сплошными) цилиндрами и

однородный незаполненный ПВ. Важно отметить, что для построения функциональных узлов на основе ЭМК со сплошными цилиндрами рабочим режимом является режим запираения, когда в кристалле отсутствуют распространяющиеся волны.

При плавном увеличении зазора d можно было ожидать плавной трансформации параметров собственных волн ЭМК, которые должны в пределе перейти в собственные волны ПВ. При этом нас больше всего интересует переход в основную T -волну.

Результаты исследования, приведенные в данной статье, показывают, что данный переход не является плавным, так как он сопровождается рядом качественных изменений. Особенно это относится к тем диапазонами частот, которые соответствуют второй полосе прозрачности. При увеличении зазора d на первом этапе периодическая структура ожидаемо становится прозрачной, т.е. в ней появляются распространяющиеся волны. Однако при определенных зазорах таких волн две: прямая и обратная, т.е. фазовый переход от режима запираения к режиму распространения происходит нестандартным образом. Далее, прямая волна исчезает, что соответствует еще одному фазовому переходу от двухволнового режима к одноволновому.

Дальнейшее увеличение зазора d приводит к расширению второй полосы прозрачности, в которой распространяется обратная волна. Периодичность структуры исчезает, и происходит переход к собственным волнам однородного ПВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yablonovitch E.* // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. № 20. P. 2059.
2. *Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. N.-J.: Princeton Univ. Press, 1995.
3. *Sakoda K.* Optical Properties of Photonic Crystals // Berlin: Springer-Verlag, 2005.
4. *Mosallaei H., Rahmat-Samii Y.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 3. P. 549.
5. *Painter O., Lee R.K., Scherer A. et al.* // Science. 1999. V. 284. № 6. P. 1819.
6. *Mekis A., Chen J.C., Kurland I. et al.* // Phys. Rev. Lett. V. 77. № 18. P. 3787.
7. *Банков С.Е.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 2. С. 133.
8. *Банков С.Е.* // РЭ. 2009. Т. 54. № 6. С. 671.
9. *Банков С.Е.* Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
10. *Банков С.Е., Калинин В.И., Фролова Е.В.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 9. С. 855.
11. *Банков С.Е., Пангонис Л.И.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 3. С. 295.
12. *Bankov S.E., Duplenkova M.D.* // First Intern. Congr. on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. 21–26 October 2007. Rome. Italy. P. 288.
13. *Банков С.Е., Курушин А.А., Гутцайт Э.М.* Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М.: Оркада, 2012.
14. *Калинин В.И., Бабаскин А.А.* // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016, № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug16/2/text.pdf>
15. *Xu F., Patrovsky A., Wu K.* // Microwave Opt. Technol. Lett. 2007. V. 49. № 9. P. 2180.
16. *Альтман К.* Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.