

А. И. НАЗАРЬКО, Ю. Ф. ТИМОФЕЕВА,  
д. т. н. Е. А. НЕЛИН, В. И. ПОПСУЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: ye.nelin@gmail.com

Дата поступления в редакцию  
28.09 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. М. А. ДРОЗДОВ  
(ВИ ОНПУ, г. Одесса)

## ПОВЫШЕНИЕ ЗОННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ

*Выполнена оценка зонной избирательности кристаллоподобных структур. Рассмотрены методы повышения избирательности электромагнитных кристаллов. Представлены экспериментальные и расчетные характеристики, иллюстрирующие возможность существенного улучшения спектральных свойств таких структур.*

Искусственные кристаллоподобные структуры (КС) составляют основу новых разнообразных устройств обработки сигналов. Значительное развитие получили фотонные кристаллы и устройства на их основе [1]. При моделировании сложных в конструктивно-технологическом отношении оптических фотонных кристаллов используют их микрополосковые аналоги — электромагнитные кристаллы (ЭК) [2]. Также ЭК интенсивно исследуют и с целью поиска путей повышения эффективности устройств радиодиапазона.

Для повышения эффективности устройств на основе КС первостепенное значение имеет повышение зонной избирательности таких структур. В настоящей работе выполнена оценка зонной избирательности КС, рассмотрены методы ее повышения для ЭК, предложены и исследованы высокоизбирательный ЭК.

Зонную избирательность КС характеризуют подавление сигнала в запрещенной зоне и ее ширина. Подавление сигнала определим отношением  $K=T_p/T_z$ , где  $T_p, T_z$  — максимальное в разрешенной и минимальное в запрещенной зонах значение модуля амплитудного коэффициента прохождения, соответственно. Оценим избирательность модельной КС, образованной четвертьволновыми слоями. Импедансы слоев нормированы к импедансу внешней среды и равны 1 и  $Z$ , причем  $Z>1$ . Значение  $T_z$  достигается на средней частоте запрещенной зоны. При этом

$T_z = 2\sqrt{Z_{вх}} / (Z_{вх} + 1)$ , где  $Z_{вх} = Z^{2N}$  — входной импеданс КС;  $N$  — число слоев с импедансом  $Z$ . Поскольку  $T_p \approx 1$ , а  $Z_{вх} \gg 1$ , то  $K \approx T_z^{-1} \approx Z^N / 2$ . Импеданс  $Z$  соответствует эффективному импедансу  $Z_{эф}$  неоднородностей КС.

Исходя из [3, с. 88], в результате преобразований для относительной ширины  $\Delta F$  первой запрещенной зоны неограниченной модельной КС получим

$$\Delta F = \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{Z-1}{Z+1}. \quad (1)$$

Обратим внимание, что здесь аргументом функции является амплитудный коэффициент отражения от границы сред с отношением импедансов  $Z$ . Непосредственная взаимосвязь ширины запрещенной зоны и коэффициента отражения иллюстрирует ключевую роль отраженных волн в формировании зонных свойств КС. Границы слоев как вторичные излучатели волны настолько сильно взаимодействуют, что свойства искусственной среды — КС — изменяются от полностью прозрачной в разрешенных зонах до полностью непрозрачной — в запрещенных.

На рис. 1 приведены зависимости, характеризующие зонную избирательность модельной КС. Как видно из зависимостей 1—3, уже при небольших значениях  $Z$  и  $N$  достигается значительное подавление сигнала в запрещенной зоне. Коэффициент прохождения порядка  $10^{-6}$  и менее характерен для туннельных квантово-механических барьеров. В запрещенной зоне ограниченная КС представляет собой туннельный барьер с чрезвычайно низкой прозрачностью. При резонансном туннелировании коэффициент прохождения равен единице. Использование этих свойств КС, например, в симметричных однобарьерных структурах

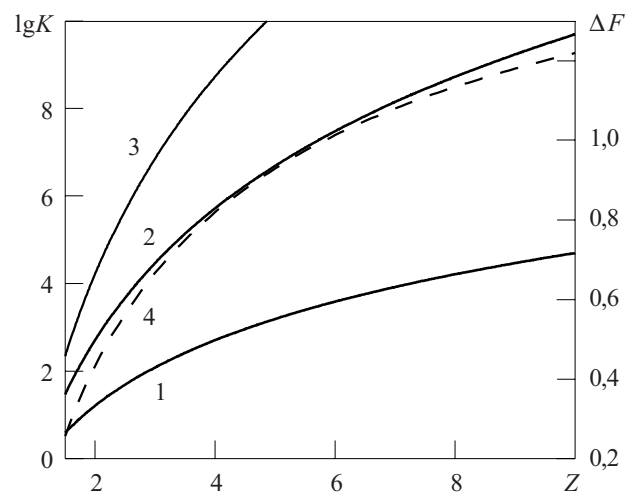


Рис. 1. Зависимости подавления сигнала  $K$  в запрещенной зоне (1—3) модельной КС с различным числом слоев  $N$  (1 — 5; 2 — 10; 3 — 15) и ширины запрещенной зоны  $\Delta F$  (4) от нормированного импеданса

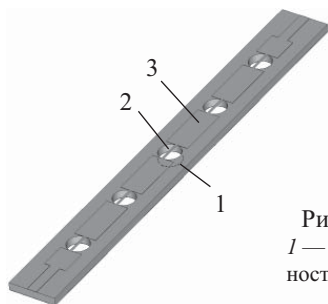


Рис. 2. Неоднородности ЭК:  
1 — на металлизированной поверхности; 2 — в диэлектрике; 3 — на сигнальной поверхности

с резонансным туннелированием [4], позволяет разрабатывать устройства с очень высокой избирательностью. Полоса пропускания соответствует резонансному туннелированию, а полоса подавления — обычному.

При  $N \geq 5$  ширина запрещенных зон ограниченной и неограниченной модельной КС практически одинакова. Как видно из зависимости 4 на рис. 1, КС обеспечивают широкополосное и сверхширокополосное подавление сигналов.

Электромагнитный кристалл (ЭК) представляет собой несимметричную микрополосковую линию передачи с периодически расположенными неоднородностями (обычно — только на металлизированной поверхности под полосковым проводником). Для максимизации  $Z_{эф}$  необходимо комбинировать неоднородности на металлизированной поверхности, в диэлектрике и на сигнальной поверхности (рис. 2). Оценим эффективность этих неоднородностей.

Неоднородности первого вида — круглые отверстия [5]. Изготовленный для проведения эксперимента ЭК с такими неоднородностями имеет следующие параметры: ширина полоскового проводника — 2,5 мм; диаметр отверстий — 8 мм; число отверстий — 5; период их расположения — 20 мм; толщина диэлектрика — 2,1 мм; его относительная диэлектрическая проницаемость — 7,0; тангенс угла диэлектрических

потерь — 0,0025 на частоте 10 ГГц; импеданс однородных областей ЭК равен 50 Ом.

На рис. 3, а приведены характеристики, иллюстрирующие зонную избирательность такого ЭК. Зависимость 2 получена трехмерным моделированием в программном пакете Microwave Studio. Экспериментальные и расчетные значения средней частоты первой запрещенной зоны  $f_0$  и  $T_3$  соответственно равны 3,43 и 3,57 ГГц; -10,4 и -16,0 дБ.

При трехмерном моделировании, намного более сложном по сравнению с одномерным, утрачивается наглядность связей между параметрами структуры и ее характеристиками. Кроме того, трехмерное моделирование требует значительных затрат машинного времени. По этим причинам представляет интерес использование одномерной модели хотя бы на начальных этапах проектирования. Параметры одномерной модели определяются из тестовых экспериментальных характеристик либо предварительным трехмерным моделированием.

Зависимость 3 на рис. 3 рассчитана по одномерной модели в виде неоднородной линии передачи, образованной отрезками с различающимися значениями волнового импеданса и относительной диэлектрической проницаемости. Длина и электрические параметры низкоомного отрезка линии равны соответствующим параметрам низкоомной области ЭК; длина высокоомного отрезка — диаметру отверстия. Относительная диэлектрическая проницаемость и волновой импеданс этого отрезка выбирались исходя из указанных экспериментальных значений  $f_0$  и  $T_3$ . Хорошее согласование зависимостей 1 и 3 иллюстрирует возможность использования в первом приближении простой одномерной модели. Из рис. 3 видно, что кривая 3 лучше соответствует экспериментальной характеристике 1, чем кривая 2. Это объясняется тем, что параметры одномерной модели были выбраны на основе экспериментальных значений, а не теоретических, полученных из трехмерной модели. Од-

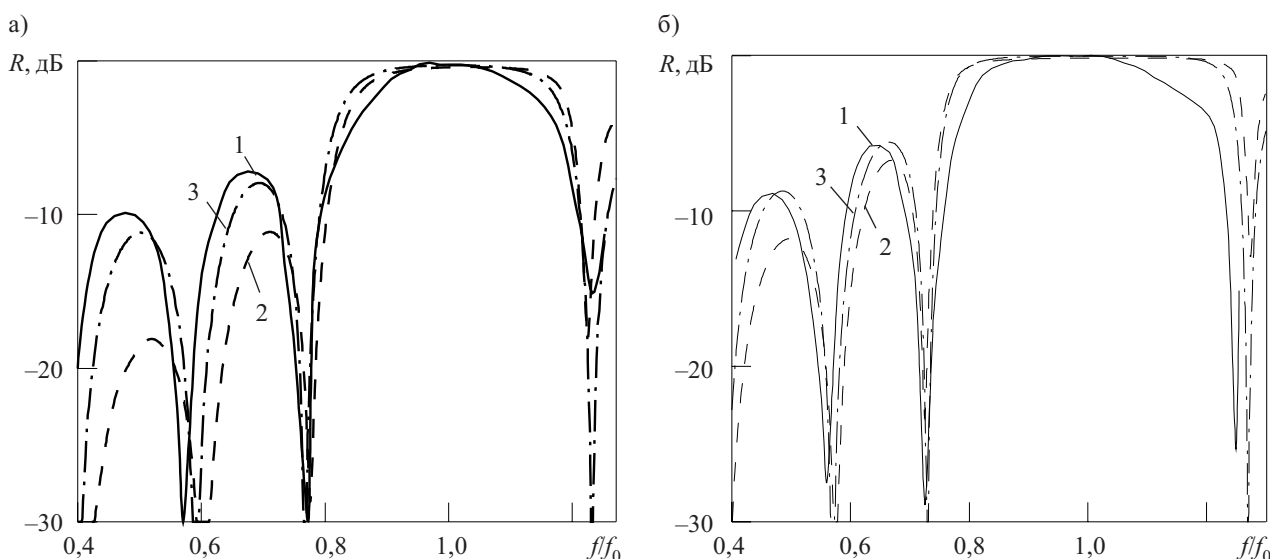


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетные (2 — трехмерная модель, 3 — одномерная) частотные зависимости коэффициента отражения  $R$  ЭК с отверстиями только в металлизированной поверхности (а); с отверстиями и в металлизированной поверхности, и в диэлектрике (б)

номерная модель позволяет оценить значение  $Z_{эф}$ , равное отношению импедансов высокоомного и низкоомного отрезков. В данном случае  $Z_{эф}=1,7$ .

Для повышения зонной избирательности ЭК необходимо увеличить значение эффективного импеданса введением дополнительных неоднородностей. Такими неоднородностями могут быть цилиндрические отверстия в диэлектрике.

Избирательность ЭК с отверстиями и в металлизированной поверхности, и в диэлектрике иллюстрируется рис. 3, б. Диаметр отверстий — 8,6 мм, глубина — 1,6 мм. Экспериментальные и расчетные значения  $f_0$  и  $T_3$  соответственно равны 3,93 и 3,98 ГГц; -20,9 и -28,4 дБ. Значение  $Z_{эф}=2,6$  соответствует увеличению эффективного импеданса в 1,5 раза. Повышение средней частоты запрещенной зоны обусловлено уменьшением эффективной относительной диэлектрической проницаемости в областях с неоднородностями, а уменьшение сигнала в запрещенной зоне и ее расширение — увеличением эффективного импеданса. Увеличение средней частоты в эксперименте составляло 15%, по расчету — 12%. Относительная ширина запрещенной зоны, определяемая по первым нулям характеристики, в эксперименте увеличилась с 46 до 53% при расчетных значениях 45 и 55%. Влияние дополнительной неоднородности возрастает с увеличением глубины отверстия. При максимальной глубине отверстия (равной толщине диэлектрика)  $Z_{эф}=3,8$ , что соответствует увеличению эффективного импеданса в 2,2 раза.

Для дальнейшего повышения зонной избирательности ЭК необходимо ввести неоднородности на сигнальной поверхности. Их можно выполнить периодическим изменением (вариацией) ширины полоскового проводника (рис. 2). Микрополосковая линия с вариацией ширины полоскового проводника извест-

на как частотно-избирательная, в том числе и как простой аналог фотонного кристалла [6].

На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие повышение избирательности ЭК при введении комбинированных неоднородностей. Ширина полоскового проводника в областях с неоднородностями равна 0,1 мм. Отверстия в диэлектрике максимальной глубины и вариация ширины проводника уменьшают значение  $T_3$  с -16 до -63 дБ и увеличивают  $\Delta F$  с 45 до 85%. При выборе значений относительной диэлектрической проницаемости и волнового импеданса высокоомного отрезка одномерной модели, исходя из значений  $f_0$  и  $T_3$  для трехмерной модели, относительная погрешность значений  $\Delta F$ , рассчитанных по одномерной модели, составляет приблизительно 10%. Максимальное значение  $Z_{эф}$  составляет 10,7. Отверстия в диэлектрике и вариация ширины полоскового проводника увеличивают эффективный импеданс в 6,3 раза. Отношение импедансов отрезков полоскового проводника, изменяющихся лишь за счет вариации его ширины, равно 2,5. Как видим, комбинирование неоднородностей позволяет существенно повысить избирательные свойства ЭК.

На рис. 5 представлены экспериментальные и полученные трехмерным моделированием частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения сигнала в ЭК с комбинированными неоднородностями с максимальной глубиной отверстия в диэлектрике. В отличие от приведенных выше параметров, здесь диаметр отверстий составлял 6 мм, вариация ширины проводника — 6 мм/0,1 мм. Узкие отрезки сигнального проводника выполнены проволочным проводником, присоединенным к широким полосковым отрезкам. Как видим, экспериментальные характеристики хорошо согласуются с расчетными. Зависимости 3 и 5 иллюстрируют влияние неоднородности на металлизированной поверхности на коэффициент про-

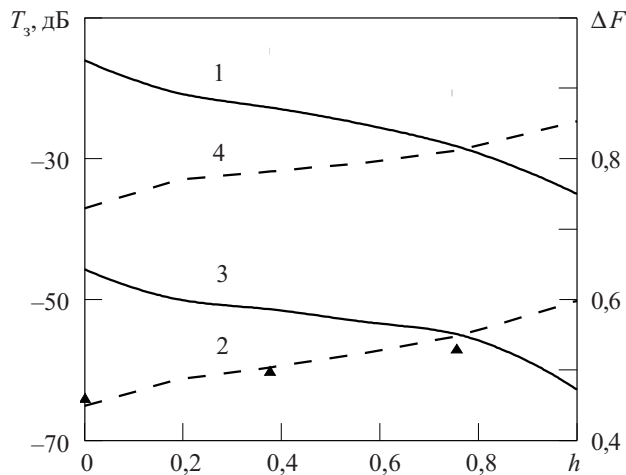


Рис. 4. Расчетные зависимости подавления сигнала в запрещенной зоне  $T_3$  (1, 3) и ширины запрещенной зоны  $\Delta F$  (2, 4) ЭК от нормированной глубины отверстия в диэлектрике  $h$  без вариации ширины полоскового проводника (1, 2) и с ее вариацией (3, 4)  
●, ▲ — экспериментальные значения соответственно  $T_3$  и  $\Delta F$  для ЭК без вариации ширины проводника

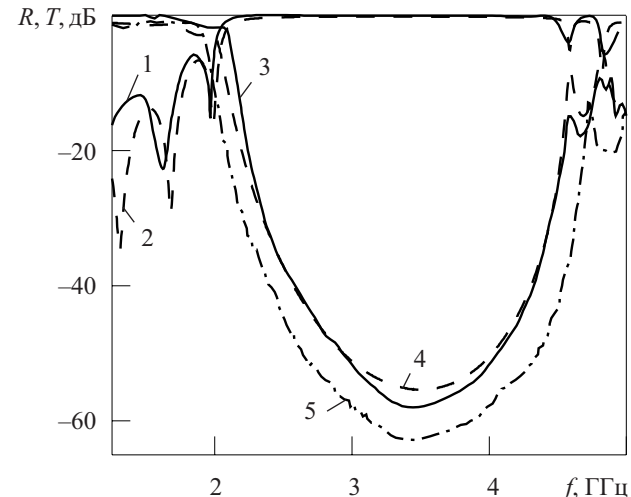


Рис. 5. Экспериментальные (1, 3, 5) и расчетные (2, 4) частотные зависимости коэффициентов отражения  $R$  (1, 2) и прохождения сигнала  $T$  (3, 4, 5) в ЭК с комбинированными неоднородностями:  
1—4 — отверстия в металлизированной поверхности закрыты медной фольгой; 5 — отверстия открыты

хождения. Для характеристики  $5 T_3 = -62$  дБ,  $f_0 = 3,49$  ГГц,  $\Delta F = 85\%$ . Отношение импедансов различных областей ЭК равно 17,5 (а за счет вариации ширины проводника — лишь 4,2).

\*\*\*

Таким образом, установлено, что повышение зонной избирательности КС обеспечивается увеличением вариации волнового импеданса за счет введения дополнительных неоднородностей и возрастания их влияния. Для предварительного моделирования КС и оценки эффективного импеданса целесообразно использовать простую одномерную модель в виде неоднородной линии передачи. Электромагнитные кристаллы с комбинированными неоднородностями позволяют сформировать структуру с высокой зонной избирательностью при небольшом числе неоднородностей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Нелин Е. А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 3.— С. 18—25.
2. Erro M. J., Laso M. A. G., Lopetegi T. et al. Modeling and testing of uniform fiber Bragg gratings using 1-D photonic bandgap structures in microstrip technology // Fiber and Integrated Optics.— 2000.— Vol. 19, N. 4.— P. 311—325.
3. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах.— М.: Мир, 1987.
4. Нелин Е. А. Импедансная модель для “барьерных” задач квантовой механики // УФН.— 2007.— Т. 177, № 3.— С. 307—313.
5. Radisic V., Qian Y., Itoh T. Broad-band amplifier using dielectric photonic bandgap structure // IEEE Microwave and Guided Wave Letters.— 1998.— Vol. 8, N 1.— P. 13—14.
6. Беляев, Б. А. Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // Радиотехника и электроника.— 2006.— Т. 51, № 6.— С. 694—701.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Родина О. В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство.— М.: Горячая линия— Телеком, 2009.— 400 с.**

Приведено систематическое и доступное изложение теоретических основ и практических вопросов проектирования и построения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Изложены принципы распространения оптических сигналов по оптическому волокну, рассмотрены конструктивные элементы оптических кабелей, особенности их конструкции и маркировки, приведены основные их параметры и методы расчета. Большое внимание уделено практическим вопросам — процессу проектирования, строительству, монтажу и технической эксплуатации ВОЛС; использованию оконечного оборудования и пассивных элементов; измерениям и измерительным приборам.

Для студентов, получающих профессиональное образование в области телекоммуникаций и слушателей курсов повышения квалификации, будет полезна специалистам в области проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС.



НОВЫЕ КНИГИ

**Вахитов Ш. Я., Ковалгин Ю. А., Фадеев А. А., Щевьев Ю. П. Акустика.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 660 с.**

Рассмотрены основные характеристики звукового поля; первичные акустические сигналы; свойства слуха и восприятие акустических сигналов; акустика помещений, концертных залов, студий звукозаписи, аппаратных; звукопоглощающие материалы и конструкции; примеры акустического оформления студий, концертных залов, аппаратных; акустико-механические системы и электромеханические преобразователи; микрофоны, громкоговорители, головные телефоны; системы озвучения и звукоусиления, системы синхронного перевода речи, конференц-системы; акустические измерения.

Для студентов, обучающихся по соответствующим специальностям, может быть полезна широкому кругу читателей, интересующихся акустическими основами инфокоммуникационных и аудиовизуальных систем различного назначения.

