

УДК 621.372.543

А. И. НАЗАРЬКО

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: nazarko@kivra.kpi.ua

МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ С НИЗКОИМПЕДАНСНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Предложены микрополосковые электромагнитные кристаллы на основе низкоимпедансных неоднородностей. Показано, что низкоимпедансные неоднородности обеспечивают существенное улучшение развязки сигналов по сравнению с традиционными высокоимпедансными.

Ключевые слова: электромагнитный кристалл, запрещенная зона, низкоимпедансная неоднородность.

Искусственные кристаллоподобные структуры представляют значительный интерес как основа разнообразных устройств обработки сигналов. Одна из разновидностей таких структур — электромагнитные кристаллы (ЭК) — позволяет значительно улучшить характеристики устройств радиодиапазона [1]. Для моделирования ЭК необходимо использовать трехмерное электромагнитное моделирование. Теоретические характеристики ЭК, приведенные в статье, рассчитаны в одной из наиболее развитых систем такого моделирования — программном пакете CST Microwave Studio (MWS).

ЭК представляет собой несимметричную микрополосковую линию передачи с периодически расположенными неоднородностями. Для повышения эффективности устройств на основе ЭК первостепенное значение имеет повышение зонной избирательности таких структур.

Зонная избирательность ЭК определяется развязкой сигналов в разрешенных и запрещенных зонах. Волновые импедансы неоднородной (Z) и однородной (Z_0) области ЭК существенно различаются. Традиционная неоднородность ЭК — отверстие, расположенное под полосковым проводником и выполненное обычно лишь на металлизированной поверхности, — является высокоимпедансной. Будем обозначать высокоимпедансные неоднородности, индексы их параметров и ЭК на их основе буквой H , а низкоимпедансные — буквой L . Развязка сигналов возрастает с увеличением отношения $\rho_H = Z_H / Z_0$ для H -неоднородностей или с уменьшением отношения $\rho_L = Z_L / Z_0$ для L -неоднородностей.

Для увеличения ρ_H необходимо выполнить отверстие еще и в диэлектрическом основании. Значение ρ_H возрастает с увеличением глубины отверстия. Так, для неоднородности, рассмотренной в [2], с углублением отверстия значение ρ_H возрастает

приблизительно с 2 до 4 при $Z_0 = 50$ Ом. Однако, поскольку углубление отверстия ограничено толщиной основания, дальнейшее увеличение ρ_H можно обеспечить комбинированной неоднородностью, объединяющей неоднородности на металлизированной поверхности, в диэлектрическом основании и на сигнальной поверхности. Для комбинированных H -неоднородностей, которые используются в фильтре [3], $\rho_H = 7$ при $Z_0 = 50$ Ом.

Низкоимпедансные неоднородности

Рассмотрим конструктивные возможности реализации L -неоднородности. Характеристический импеданс микрополосковой линии уменьшается при расширении сигнального проводника, при уменьшении толщины диэлектрика и увеличении его диэлектрической проницаемости. Исходя из этого L -неоднородностью может являться несквозное металлизированное отверстие в основании, гальванически связанное с металлизированной поверхностью, или отверстие в основании, заполненное диэлектриком с более высокой диэлектрической проницаемостью, чем основание.

На рис. 1 показан ЭК с L -неоднородностями в виде металлизированных отверстий. На одной

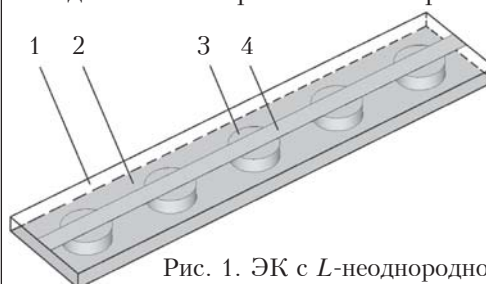


Рис. 1. ЭК с L -неоднородностями в виде металлизированных отверстий:
1 — диэлектрическое основание; 2 — слой металлизации; 3 — металлизированные отверстия; 4 — полосковый проводник

стороне диэлектрического основания 1 выполнена металлизация 2 и ряд периодически размещенных в слое металлизации и в основании металлизированных отверстий 3, гальванически связанных с металлизацией основания. На другой стороне основания размещен полосковой проводник 4. Глубина отверстий h' меньше толщины основания h . Величина h' рассчитывается из выражения для волнового импеданса Z несимметричной микрополосковой линии [4]

$$Z = \frac{120\pi / \sqrt{\epsilon_e}}{x + 1,393 + 0,667 \ln(x + 1,444)}, \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2\sqrt{1 + 12/x}}, \quad (2)$$

где ϵ и ϵ_e — относительная и относительная эффективная диэлектрическая проницаемость;

$$x = w / \Delta h;$$

w — ширина сигнального проводника;

$\Delta h = h - h'$ — зазор между отверстием и сигнальным проводником.

Покажем, что низкоимпедансные неоднородности более эффективны по сравнению с традиционными высокоимпедансными. Воспользуемся формулами (1) и (2). Для узких зазоров, когда $x \gg 1$, выполняется условие $\epsilon_e \approx \epsilon$ и тогда $Z \approx 120\pi \Delta h / (w\sqrt{\epsilon})$. В этом случае величина импеданса прямо пропорциональна ширине зазора и обратно пропорциональна ширине проводника.

Рассчитаем возможное значение ρ_L для L -неоднородности с параметрами, соответствующими H -неоднородности из [3]: $\epsilon = 10,2$, $h = 1,28$ мм, $w = 8$ мм. При $h' = 1$ мм согласно (1) имеем $Z_L = 3,8$ Ом (по приближенной формуле для узких зазоров $Z_L = 4,1$ Ом), что соответствует $\rho_L = 0,08$. Поскольку $\rho_L^{-1} / \rho_H = 1,8$, ЭК- L заметно эффективнее ЭК- H .

Рассмотрим соотношение между ϵ_{eH} и ϵ_{eL} . Для H -неоднородности из [3] $\epsilon_{eH} = 1,5$. Согласно (2), $\epsilon_{eL} = 9,5$. Поскольку $\epsilon_{eL} \gg \epsilon_{eH}$, при заданной электрической длине размер L -неоднородности в направлении распространения волны должен быть существенно меньше, чем для H -неоднородности. При одинаковых габаритах диапазон рабочих частот ЭК- L ниже, чем ЭК- H , а для заданного диапазона частот габариты ЭК- L меньше по сравнению с ЭК- H .

Представленные на рис. 2 частотные зависимости коэффициентов прохождения T и отражения R сигнала в первой полосе подавления соответствуют предложенному ЭК- L с металлизированными отверстиями (см. рис. 1) и традиционному ЭК с отверстиями без металлизации [5] (f_0 — средняя частота первой запрещенной зоны). Параметры устройств следующие: длина $a = 60$ мм, ширина $b = 13$ мм, $h = 2,1$ мм, $w = 2,5$ мм, толщина медной фольги $t = 0,05$ мм,

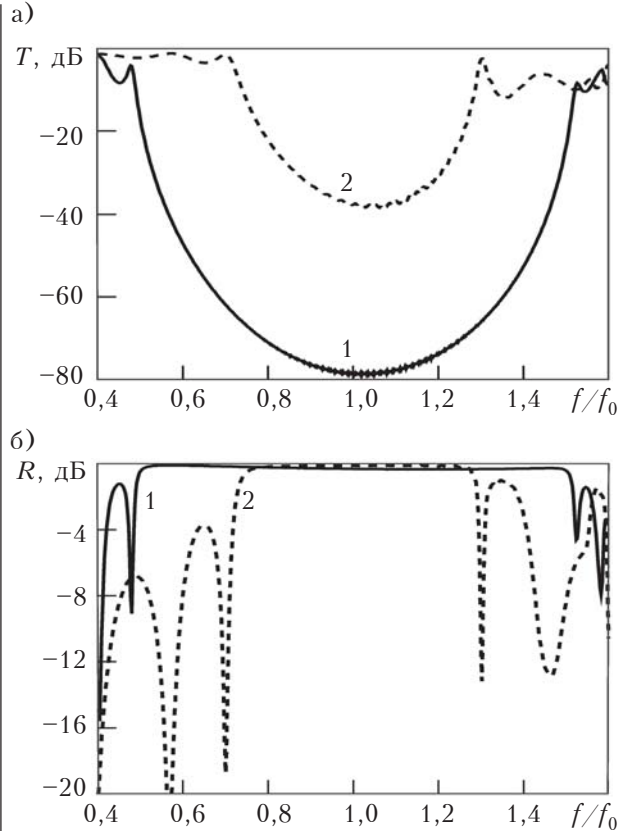


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов прохождения (а) и отражения (б) сигнала для ЭК- L с металлизированными отверстиями (1) и традиционного ЭК с отверстиями без металлизации (2)

период структуры $p = 12$ мм, диаметр отверстий $d = 6$ мм, $h' = 1,9$ мм, количество отверстий $n = 5$. Материал подложки — Флан-7,2 с параметрами: $\epsilon = 7$, тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц $\text{tg} \delta = 0,0025$.

Волновой импеданс однородных областей равен 50 Ом, а неоднородных областей — 9,3 Ом в ЭК- L и 152,2 Ом в ЭК без металлизации отверстий [5], что отвечает значениям $\rho_H = 3,0$, $\rho_L^{-1} = 5,4$, $\rho_L^{-1} / \rho_H = 1,8$. При использовании L -неоднородностей отношение импедансов разнородных областей ЭК увеличивается почти в два раза, что обеспечивает существенное расширение полос подавления и уменьшение уровня сигнала в этих полосах. Абсолютная и относительная ширина полосы подавления (по первым нулям характеристики), минимальный уровень сигнала в этой полосе и частота f_0 для устройств 1 и 2 равны, соответственно, 5,14 и 4,18 ГГц; 104 и 60%; -79 и -38 дБ; 4,93 и 6,94 ГГц.

L -неоднородности со стороны сигнального проводника

Волновой импеданс неоднородности в виде металлизированного отверстия определяется диэлектрической проницаемостью основания, зазором между сигнальным проводником и отверстием и площадью перекрытия сигнального про-

водника «дном» отверстия. При заданных материале основания и ширине зазора значение Z_L уменьшается с увеличением площади перекрытия. Наибольшую площадь перекрытия, равную площади дна отверстия, имеет сигнальный проводник, форма и размеры которого над отверстием такие же, как и форма и размеры дна. Таким образом, минимальное значение Z_L ограничено площадью дна отверстия. Дальнейшее повышение эффективности L -неоднородностей обеспечивается выполнением отверстий со стороны сигнального проводника.

В случае, показанном на рис. 3, волновой импеданс определяется площадью всей поверхности отверстия, а не только площадью его дна. При одинаковых диаметрах неоднородность со стороны сигнального проводника эффективнее

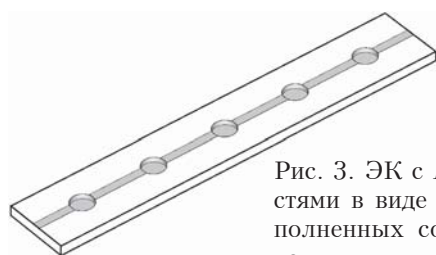


Рис. 3. ЭК с L -неоднородностями в виде отверстий, выполненных со стороны сигнального проводника и гальванически связанных с ним

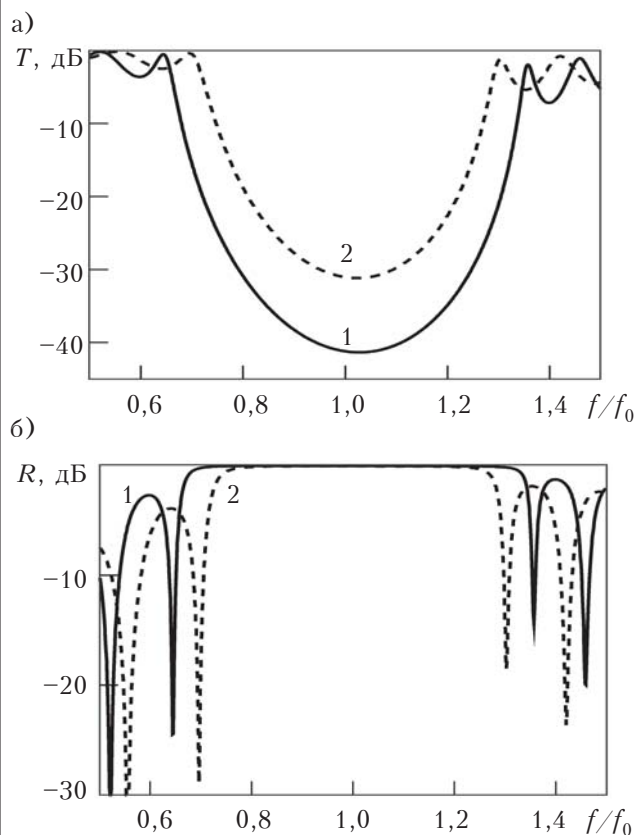


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов прохождения (а) и отражения (б) для ЭК- L с неоднородностями, выполненными на сигнальной (1) и на заземленной (2) поверхностях

неоднородности со стороны металлизированной поверхности. Это обеспечивает уменьшение волнового импеданса и, значит, улучшение развязки сигналов.

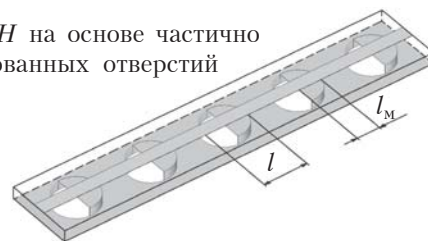
Зависимости на рис. 4 иллюстрируют повышение эффективности ЭК- L при выполнении неоднородностей на сигнальной поверхности (1) в сравнении с неоднородностями на заземленной поверхности (2). Параметры ЭК следующие: $a=53$ мм, $b=9$ мм, $t=0,035$ мм, $h=1,28$ мм, $w=1,1$ мм, $p=10$ мм, $d=3$ мм, $h'=0,7$ мм, $n=5$. Материал подложки — Rogers RO3010 с параметрами: $\epsilon=10,2$, $\text{tg}\delta=0,0023$. В ЭК- L 2 полосковый проводник над отверстиями имеет форму и размеры дна отверстия.

Абсолютная и относительная ширина полосы подавления, минимальный уровень сигнала в этой полосе и частота f_0 для ЭК- L 1 и 2, соответственно, равны 3,64 и 3,21 ГГц; 71 и 61%; -41 и -31 дБ; 5,10 и 5,29 ГГц. ЭК- L 1 улучшает развязку сигналов на 10 дБ.

ЭК на основе L/H -неоднородностей

Введение в неоднородность дополнительной внутренней границы между разнородными областями позволит сформировать дополнительный (внутренний) отражатель, что повысит эффективность L -неоднородности. Поскольку в такой неоднородности сочетаются металлизированная и неметаллизированная области, обозначим ее как L/H -неоднородность.

Рис. 5. ЭК- L/H на основе частично металлизированных отверстий



На рис. 5 показан ЭК с L/H -неоднородностями. В направлении распространения волны размер l_m области металлизации каждого из отверстий меньше размера l отверстия. Наиболее технологичное решение определяется условием $l_m=l/2$. При оптимальных значениях l_m , которые рассчитываются моделированием, достигается минимум T_1 или максимум T_2 . Индекс при T соответствует номеру запрещенной зоны, т. е. обеспечивается максимальная эффективность ЭК в первой запрещенной зоне и максимальное подавление второй запрещенной зоны, что дает дополнительные возможности в формировании частотных характеристик устройства на основе ЭК.

Рис. 6 иллюстрирует улучшение развязки сигналов ЭК- L/H (1) в сравнении с ЭК- L с полностью металлизированными отверстиями (2). Параметры ЭК следующие: $a=74$ мм, $b=13$ мм, $t=0,035$ мм, $h=2,1$ мм, $w=2,5$ мм, $p=14$ мм, $d=8$ мм, $h'=1,7$ мм, $n=5$, материал подложки — Флан-7,2. Значение T_1 и средней

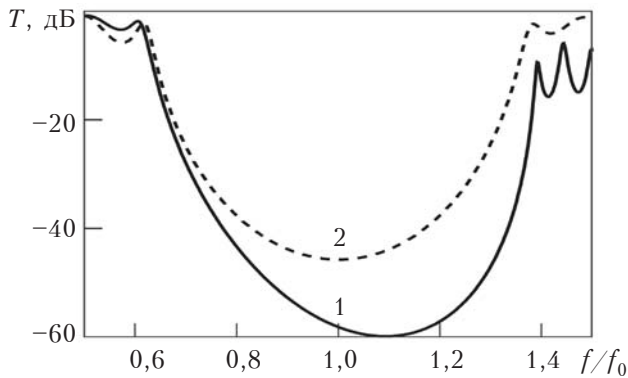


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициентов прохождения ЭК-L/H при $l_m = l/2 = 4$ мм (1) и ЭК-L с полностью металлизированными отверстиями (2)

частоты f_0 устройств 1 и 2 равны, соответственно, $-59,9$ и $-45,8$ дБ; $4,56$ и $4,33$ ГГц.

Для ЭК-L/H из условия минимума T_1 получим $l_m = 4,5$ мм. При этом $T_1 = -60,3$ дБ, что лишь на $0,4$ дБ меньше, чем в случае $l_m = 4$ мм. Таким образом, значение $l_m = 4$ мм близко к оптимальному.

Из условия максимума T_2 имеем $l_m = 7,4$ мм. В этом случае $T_1 = -48,3$ дБ, а $T_2 = -3,8$ дБ.

Для ЭК-L $T_2 = -13,9$ дБ. По сравнению с ЭК-L, ЭК-L/H обеспечивает уменьшение значения T_1 на $2,5$ дБ и повышение значения T_2 на $10,1$ дБ. В характеристике ЭК-L/H вторая запрещенная зона отсутствует.

По сравнению с ЭК-L, при $l_m = 4$ мм ЭК-L/H улучшает развязку сигналов на $14,1$ дБ, а при $l_m = 4,5$ мм — на $14,5$ дБ.

Устройства на основе L-неоднородностей

На рис. 7 приведены частотные зависимости коэффициента прохождения сигнала для ЭК-L на основе неоднородностей на заземленной поверхности с такими параметрами: $w=2,5$ мм, $d=8,6$ мм, $p=20$ мм, $n=5$, $h=2,1$ мм, $h'=1,7$ мм, материал подложки — Флан-7,2, $Z_0=50$ Ом.

Согласно выражениям (1) и (2), $Z_L=17,5$ Ом, $\epsilon_{eL}=5,8$. Исходя из одномерной модели ЭК-L в виде линии передачи, образованной чередующимися отрезками с импедансами Z_L и Z_0 , характеристике 2 соответствуют значения $Z_L=15,5$ Ом и $\epsilon_{eL}=5,6$, что хорошо согласуется с полученными из (1) и (2). Экспериментальные и расчетные значения средней частоты запрещенной зоны, определяемой минимумом коэффициента прохождения $T_{\min}$, и значение $T_{\min}$ равны, соответственно, $3,33$ и $3,27$ ГГц, -43 и -44 дБ. Экспериментальные и расчетные параметры для ЭК-H, который отличается от рассмотренного ЭК-L тем, что отверстия неметаллизированные, такие: $4,19$ и $4,04$ ГГц, -22 и -30 дБ. При этом $\epsilon_{eH}=1,7$, $Z_H=130$ Ом. Меньшее значение $T_{\min}$ для ЭК-L объясняется тем, что $\rho_L^{-1}=3,2 > \rho_H^{-1}=2,6$ и длина L-неоднородности намного ближе к четвертьвол-

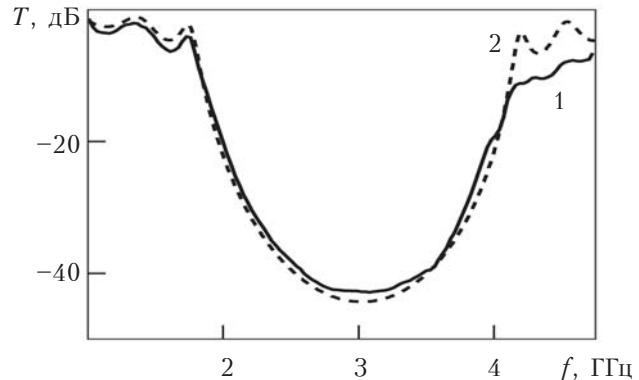


Рис. 7. Экспериментальная (1) и расчетная (2) частотные зависимости коэффициента прохождения для ЭК-L на основе неоднородностей на заземленной поверхности

новой в сравнении с H-неоднородностью (соответственно, $0,9$ и $0,6$ от четверти длины волны). Уменьшение средней частоты ЭК-L обусловлено меньшей скоростью волны, поскольку $\epsilon_{eL} > \epsilon_{eH}$.

Предложенные L-неоднородности позволяют не только формировать высокоэффективные ЭК, но и могут быть использованы как отдельные эффективные отражатели или резонаторы в структурах фильтров. На рис. 8 показана структура узкополосного фильтра, соответствующая

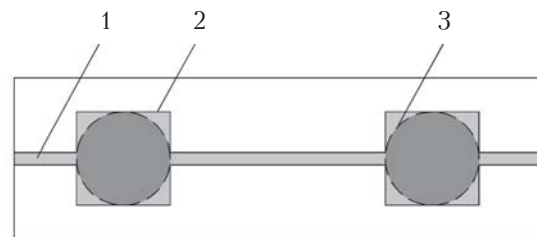


Рис. 8. Фильтр на основе L-неоднородностей: 1 — полосковый проводник, 2 — широкий полосковый отрезок, 3 — L-неоднородность

резонатору Фабри — Перо. Отражатели резонатора формируются отдельными L-неоднородностями, а резонаторная полость — отрезком полоскового проводника. Для снижения Z_L сигнальный проводник над неоднородностями имеет ширину, равную диаметру отверстий. Резонансный отклик фильтра обусловлен резонансным прохождением волны. Для повышения коэффициента отражения отражателя необходимо использовать несколько периодически расположенных неоднородностей в виде кристаллоподобной структуры (КС). Резонансный отклик такого фильтра соответствует уровню дефекта суммарной КС, образованной КС-отражателями, в ее запрещенной зоне.

На рис. 9 приведены характеристики фильтра со структурой, соответствующей рис. 8, имеющей следующие параметры: $a=42,2$ мм, $b=13$ мм, $t=0,035$ мм, $h=1,28$ мм, $w=1$ мм, $d=7,5$ мм, $h'=0,65$ мм, расстояние между неоднородностями

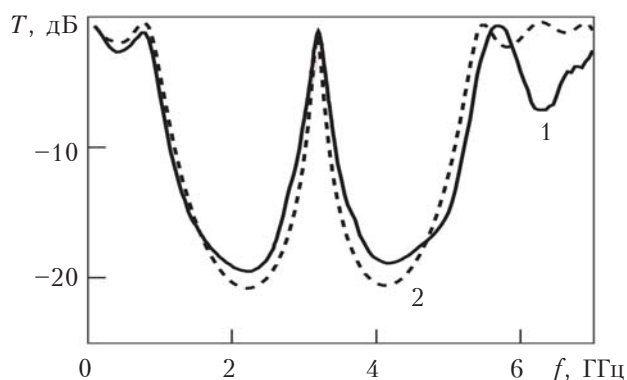


Рис. 9. Экспериментальная (1) и расчетная (2) амплитудно-частотные характеристики фильтра на основе L -неоднородностей

ми 17,2 мм. Материал подложки — Rogers RO3010, $h=1,28$ мм, $h'=0,65$ мм, толщина металлизации 0,035 мм, $Z_0=50$ Ом. Согласно выражениям (1) и (2), $Z_L=8,4$ Ом, $\epsilon_{eL}=8,8$. Экспериментальные и расчетные значения средней частоты и вносимых потерь совпадают и равны, соответственно, 3,2 ГГц и 1,5 дБ; экспериментальные и расчетные значения ширины полосы пропускания по уровню -3 дБ равны, соответственно, 0,18 и 0,15 ГГц.

Выводы

Проведенные исследования показали, что ЭК с низкоимпедансными неоднородностями более эффективны, чем с высокоимпедансными. ЭК- L обеспечивают существенное улучшение развязки сигналов по сравнению с ЭК- H (например, в одном из рассмотренных вариантов с -38 до -79 дБ). Предложенные варианты L -неоднородностей позволяют реализовать ЭК в различных конструктивных решениях микрополосковых устройств. L -неоднородности могут быть использованы как отдельные эффективные отражатели или резонаторы в структурах фильтров. Структура на основе двух L -неоднородностей как отражателей резонатора Фабри—Перо позволяет реализовать узкополосный фильтр.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Weng L. H., Guo Y. C., Shi X. W., Chen X. Q. An overview on defected ground structure // Progress In Electromagnetics Research. — 2008. — Vol. 7, B. — P. 173—189.

2. Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелин Е. А., Попсуй В. И. Повышение зонной избирательности микроволновых кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 38—41. [Nazarko A. I., Timofeeva Yu. F., Nelin E. A., Popsui V. I. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2009. N 6. P. 38]

3. Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. Узкополосный частотный фильтр на основе кристаллоподобных неоднородностей // ЖТФ. — 2010. — Т. 80, Вып. 10 — С. 148—149. [Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I., Timofeeva Yu. F. // Technical Physics. — 2010. — Vol. 55, N. 10 — P. 1536—1537]

4. Hong J. S., Lancaster J. Microstrip filters for RF/microwave applications. — New York: Wiley, 2001.

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.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.07 2011 г.

Nazarko A. I. **Microstrip electromagnetic crystals with low-impedance inhomogeneities.**

Keywords: electromagnetic crystal, forbidden gap, low-impedance inhomogeneity.

It is shown, that the low-impedance inhomogeneities provide a significant improvement in signals decoupling compared to conventional high-impedance inhomogeneities. Proposed low-impedance inhomogeneities allow to create high-effective electromagnetic crystals, and also can be used as separate effective reflectors or resonators in filter structures.

Ukraine, NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».

Назарько А. І. **Мікросмужкові електромагнітні кристали з низькоімпедансними неоднорідностями.**

Ключові слова: електромагнітний кристал, заборонена зона, низькоімпедансна неоднорідність.

Показано, що низькоімпедансні неоднорідності забезпечують істотне поліпшення розв'язки сигналів в порівнянні з традиційними високоімпедансними. Запропоновано мікросмужкові електромагнітні кристали на основі низькоімпедансних неоднорідностей.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».