

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ
КРИСТАЛОПОДІБНИХ ТА ТРАДИЦІЙНИХ
МІКРОСМУЖКОВИХ СТРУКТУР¹**

Назарько А. І., к.т.н

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут», Київ, Україна*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CRYSTAL-LIKE AND TRADITIONAL
MICROSTRIP STRUCTURES EFFICIENCY**

Nazarko A. I.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

Вступ

Мікросмужкові частотно-селективні пристрої мають широке застосування в радіотехнічних системах різного призначення. Значного розвитку набули телекомунікаційні технології в діапазонах L...Ku, наприклад, Wi-MAX (1,5–13,6 ГГц). Для таких систем необхідні високоефективні пристрої нового покоління. Розвиток фотонних кристалів привів до появи мікросмужкових електромагнітних кристалів (ЕК) радіодіапазону. Фотонні кристали і ЕК — кристалоподібні структури (КС), утворені періодично розміщеними неоднорідностями. У КС пропускання хвиль обумовлене резонансним проходженням у дозволених зонах і тунелюванням в заборонених зонах (ЗЗ). Ці ефекти забезпечують гранично можливий діапазон керування хвилями: від повного пропускання до майже повного непропускання. Мікросмужкова лінія (МСЛ) з варіацією ширини смужкового провідника відома як частотно-селективна, у тому числі і як простий аналог фотонних кристалів.

В ЕК-пристроях виконують двовимірні неоднорідності на заземленій або сигнальній поверхнях. Ефективність ЕК-неоднорідності визначається відношенням імпедансів неоднорідної і однорідної областей. Відомі ЕК-неоднорідності лише високоімпедансні і лише вдвічі підвищують максимальне значення імпедансу порівняно з традиційними МСЛ, що забезпечують імпеданси в діапазоні ~20...100 Ом. Як показали наші дослідження, тривимірні низькоімпедансні [1] та високоімпедансні [2] ЕК-неоднорідності значно розширюють діапазон імпедансів (~5...500 Ом), що суттєво підвищує ефективність ЕК-пристроїв.

Забезпечення максимальної ефективності ЕК-неоднорідностей дозво-

¹ Електронний варіант статті: <http://radar.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/830>

лить збільшити ефективність ЕК-пристроїв на їх основі. При заданих характеристиках ЕК-пристроїв з використанням високоефективних ЕК-неоднорідностей зменшаться розміри цих пристроїв.

ЕК — складні тривимірні структури, для дослідження яких необхідно використовувати тривимірний електромагнітний аналіз, зокрема в роботі використано моделювання методом скінченного інтегрування, реалізованого в середовищі CST Microwave Studio.

Метою статті є порівняльний аналіз ефективності структур і пристроїв на основі електромагнітних кристалів з традиційними рішеннями на основі мікросмужкової лінії.

Кристалоподібні неоднорідності

Мікросмужкові ЕК, що спочатку були лише аналогами фотонних кристалів, стали основою нового напрямку в розробці мікросмужкових пристроїв. На рис. 1 показано фрагмент конструкції традиційної МСЛ (а, 1 — сигнальний провідник, 2 — заземлена поверхня), а також типові окремі ЕК-неоднорідності на заземленій (б) та на сигнальній поверхні (в). ЕК-неоднорідності уявляють собою отвори різної конфігурації.

Значний розвиток в дослідженнях та в розробках нових пристроїв обробки сигналів мають мікросмужкові ЕК з періодично розміщеними під смужковим провідником неоднорідностями в металізації або в металізації та в діелектричній основі. В [3] запропоновано конструкцію ЕК на основі отворів лише в металізації. Виконання отворів в діелектрику безпосередньо під смужковим провідником суттєво підвищує ефективність неоднорідностей ЕК у порівнянні з лише отворами в металізованій поверхні. Для розміщення смужкового провідника в ЕК з такими неоднорідностями в [4] використано додаткову діелектричну основу.

Неоднорідності на заземленій поверхні (в англійській літературі — defected ground structures, DGS) мають вид вікна (отвір або щілина різної форми) і за рахунок контурів струму на межах вікна збуджують поширення електромагнітних хвиль. Недолік таких неоднорідностей — підвищення рівня електромагнітного випромінювання. Неоднорідності на сигнальній поверхні (defected microstrip structures, DMS) аналогічні DGS і створюють контури струму в

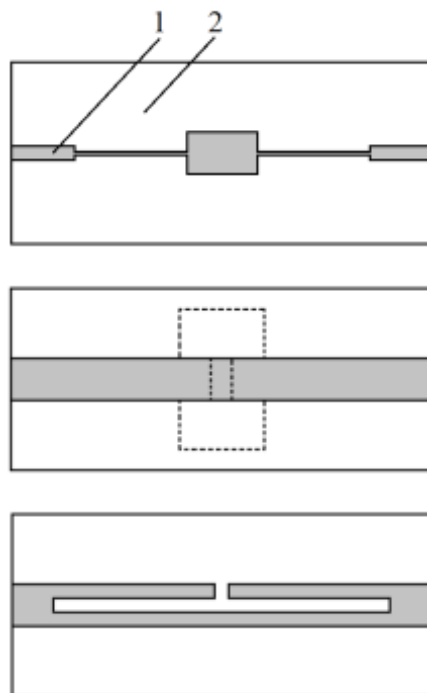


Рис. 1. Традиційна мікросмужкова лінія (а, 1 — сигнальний провідник, 2 — заземлена поверхня) та відомі ЕК-неоднорідності — DGS (б) та DMS (в).

сигнальному провіднику. У першому наближенні неоднорідності як першого, так і другого типів моделюють еквівалентними схемами з зосередженими параметрами. Альтернативний підхід [1] полягає у визначенні еквівалентного хвильового імпедансу Z , що характеризує ефективність неоднорідності, та відносної ефективної діелектричної проникності ϵ_e неоднорідності.

В МСЛ (рис. 1, а) широким відрізком сигнального провідника відповідають низьке значення Z та високе ϵ_e , а вузьким — навпаки. Мінімальне і максимальне значення Z Z_{min} і Z_{max} приблизно дорівнюють 20 Ом і 100 Ом і обмежуються допустимими максимальною і мінімальною шириною провідника. Кожний з таких відрізків можна розглядати як просту хвильову неоднорідність одновимірного ЕК, аналогічного одновимірному фотонному кристалу — тонкоплівковому оптичному фільтру. ЕК-неоднорідності (рис. 1, б і в) більш ефективні і забезпечують $Z_{max} \sim 200$ Ом [5].

Лінію передачі характеризують такі формули:

$$Z = \sqrt{L/C}, \quad v = 1/\sqrt{LC}, \quad (1)$$

де L і C — еквівалентні погонні індуктивність і ємність, v — швидкість поширення електромагнітних хвиль.

У відомих ЕК-неоднорідностей додаткові контури струму підвищують значення L , а значення C за рахунок отвору дещо зменшується. Як бачимо з (1), це відповідає високому імпедансу і сповільненню хвилі. Таким чином, відомі ЕК-неоднорідності принципово високоімпедансні. Позначимо високоімпедансні і низькоімпедансні неоднорідності, індекси їх параметрів та ЕК на їх основі буквами «в» і «н». Ефективність ЕК зростає з підвищенням відношення $\rho_n = Z_0/Z_n$ для n -неоднорідності або $\rho_v = Z_v/Z_0$ для v -неоднорідності, де Z_0 — імпеданс однорідного середовища. Максимальне значення Z_v обмежене розмірами неоднорідності.



Рис. 2. Діапазони імпедансів традиційної МСЛ-, DGS- та ЕК-неоднорідностей.

Для підвищення ефективності ЕК-пристроїв принциповим є створення ЕК на основі n -неоднорідностей. Згідно з (1), такі неоднорідності необхідно формувати на основі високої погонної ємності. Оскільки ємність залежить не лише від розмірів неоднорідності, але й від зазору між різнополярними площинами, можна очікувати збільшення відношення ρ_n [1].

Відомі ЕК-неоднорідності конструктивно обмежені лише однією площиною, що в свою чергу обмежує і ефективність. Перехід до об'ємної конструкції значно розширить можливі конструктивні рішення ЕК, у тому числі і дозволить реалізувати n -неоднорідності. Висока погонна ємність,

необхідна для таких неоднорідностей, буде визначатися зазором між різнополярними площинами. У відповідному конструктивному рішенні об'ємні неоднорідності забезпечать і підвищення максимального значення Z . Оскільки імпеданси n - та v -неоднорідностей можуть досягати 5 Ом та 500 Ом, відповідне значення $\rho = 100$ (рис. 2). У порівнянні з традиційною МСЛ DGS та DMS дозволяють збільшити значення ρ лише вдвічі з 5 до 10, що значно менше, ніж запропоновані об'ємні ЕК-неоднорідності.

Поєднання в структурі ЕК v - і n -неоднорідностей дозволяє досягти максимального відношення імпедансів різнорідних областей і, як наслідок, — максимальної ефективності ЕК.

Ефективність електромагнітних кристалів

Порівняємо ефективність ЕК на основі запропонованих і відомих неоднорідностей. У [6] розглянуто ЕК, утворений чергуванням традиційних неоднорідностей — низько- та високоімпедансних відрізків (n - та v -відрізків) смужкового провідника (рис. 3, а). Позначимо цей ЕК як ЕК1. ЕК2 (рис. 3, б) відрізняється від ЕК1 тим, що n -неоднорідності виконано у вигляді металізованої порожнини зі сторони сигнального провідника [7, 8] глибиною $0,5s$ (де s — товщина основи) та введено додатково між n -неоднорідностями по дві v -неоднорідності у вигляді наскрізних отворів в шарі діелектрика та металу та навісним провідником над ними з параметрами: діаметр $d = 3,92$ мм, період $p = 7,04$ мм. Матеріал основи Rogers ТММ10і з параметрами: відносна діелектрична проникність $\epsilon = 9,8$, тангенс кута діелектричних втрат на частоті 10 ГГц $\text{tg}\delta = 0,002$, $s = 1,00$ мм, товщина металізації $t = 0,01$ мм, ширина мікросмужкового провідника $w = 0,96$ мм забезпечує хвильо-

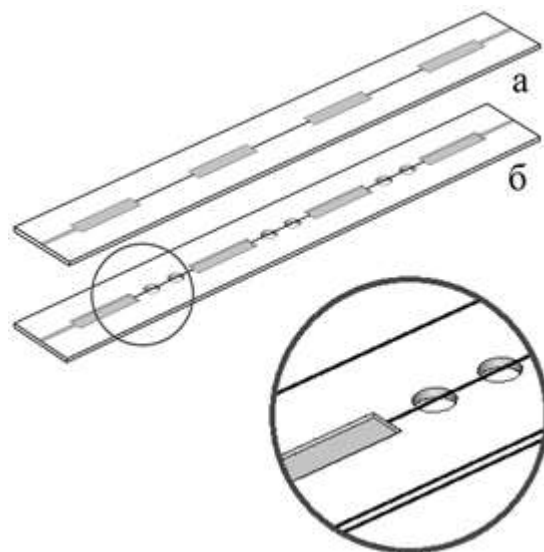


Рис. 3. Структура ЕК1 (а) та ЕК2 (б).

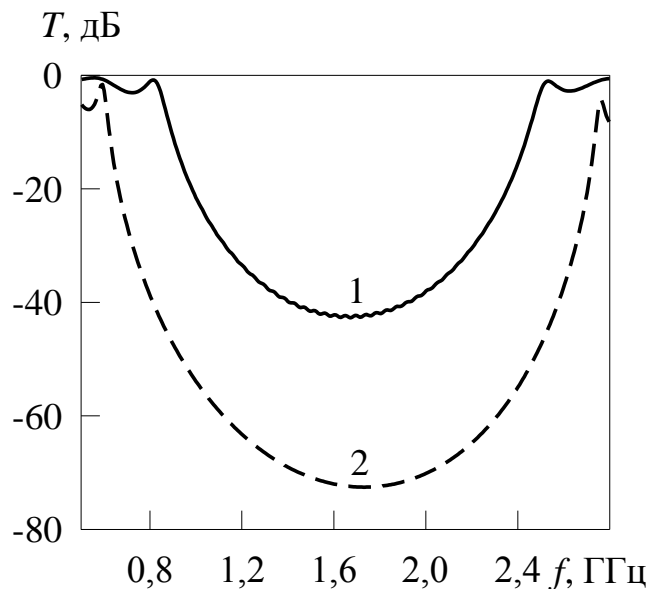


Рис. 4. Характеристики ЕК1 (1) та ЕК2 (2).

вий імпеданс 50 Ом, ширина основи 20 мм.

Характеристики, приведені на рис. 4, ілюструють суттєве підвищення ефективності ЕК при використанні запропонованих неоднорідностей; значення мінімуму коефіцієнта проходження T_{min} зменшується з -43 дБ до -73 дБ.

При заданому рівні максимального подавлення в першій ЗЗ оцінимо зменшення габаритів ЕКЗ, утвореного чергуванням n - і v -неоднорідностей (рис. 5, а), у порівнянні з ЕК1.

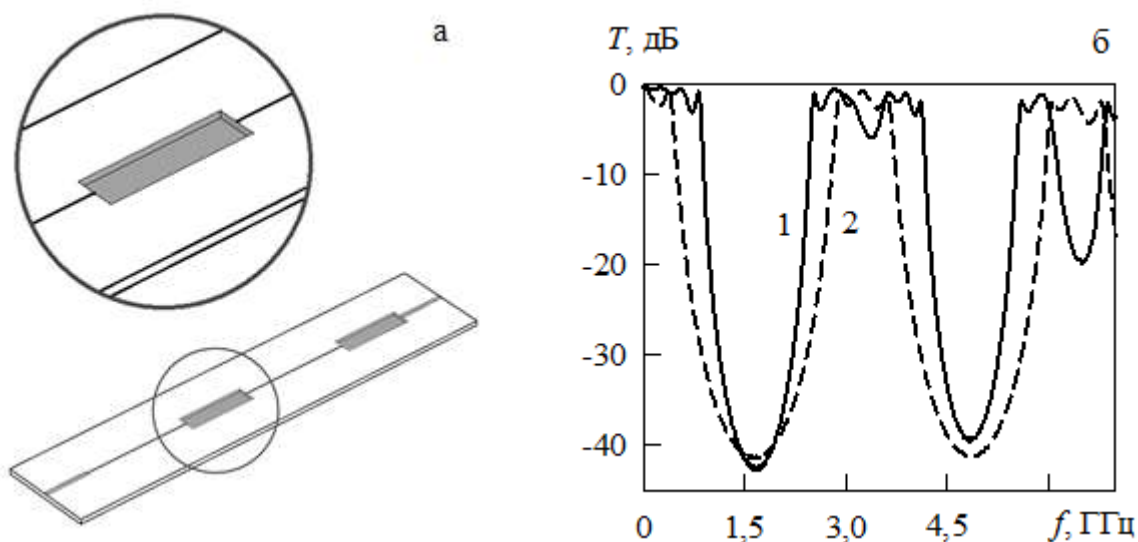


Рис. 5. Структура ЕК3 (а); характеристики (б) ЕК1 (1) та ЕК3 (2).

Довжини n - і v -неоднорідностей 14,6 мм і 23,2 мм, ширина n -неоднорідності 3,92 мм, товщина діелектрика неоднорідності $s' = 0,3$ мм, діаметр провідника v -неоднорідності 0,1 мм. Довжина ЕК1 та ЕК3 становлять 120,33 мм і 75,6 мм відповідно, що при заданому рівні подавлення відповідає зменшенню довжини на 37 %.

Як видно з характеристик на рис. 5, б, ЕК3 забезпечує необхідне значення T_{min} , однак розширюються і ЗЗ.

Задану ширину першої ЗЗ та значення T_{min} забезпечує ЕК4 на основі тривимірних ЕК-неоднорідностей (рис. 6). Структура ЕК4 сформована чергуванням n - і v -неоднорідностей [9]. Ширина неоднорідностей 2,8 мм, довжина n - і v -неоднорідності 7,8 мм та 11,0 мм, довжина середнього відрізка між ними 9,16 мм, діаметр провідника v -неоднорідності 0,05 мм, $s' = 0,4$ мм. Довжи-

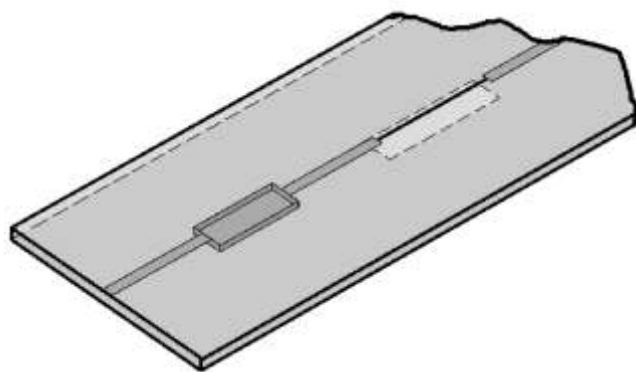


Рис. 6. Фрагмент структури ЕК4.

на a і ширина b ЕК4, що дорівнюють 102,2 мм і 2,8 мм, зменшились на 15 % і 29 % відповідно. Це відповідає зменшенню площі структури на 40 %.

Характеристики ЕК1 та ЕК4 приведено на рис. 7. Як бачимо, в цих ЕК практично співпадають ширина першої ЗЗ та значення T_{min} .

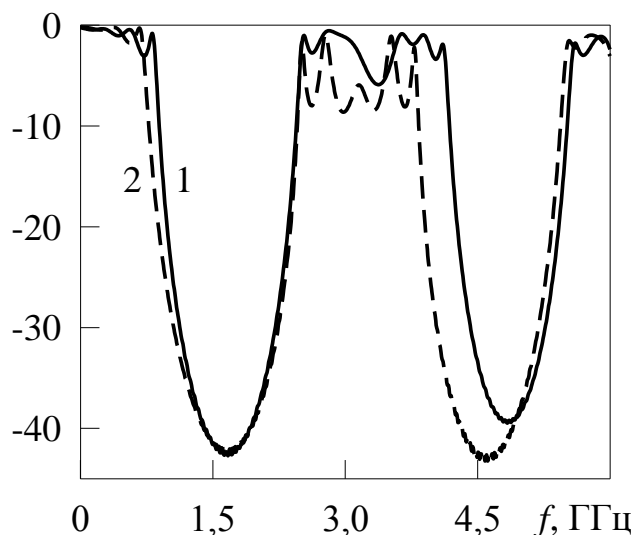


Рис. 7. Характеристики ЕК1 (1) та ЕК4 (2).

Порівняння характеристик пристроїв

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання вузькосмугових фільтрів на основі запропонованих тривимірних ЕК- n -неоднорідностей зі сторони сигнального провідника [7, 8].

На рис. 8, а показано структури вузькосмугового фільтра на основі тривимірних ЕК-неоднорідностей (1) та традиційної МСЛ (2), які розглянуто в [10].

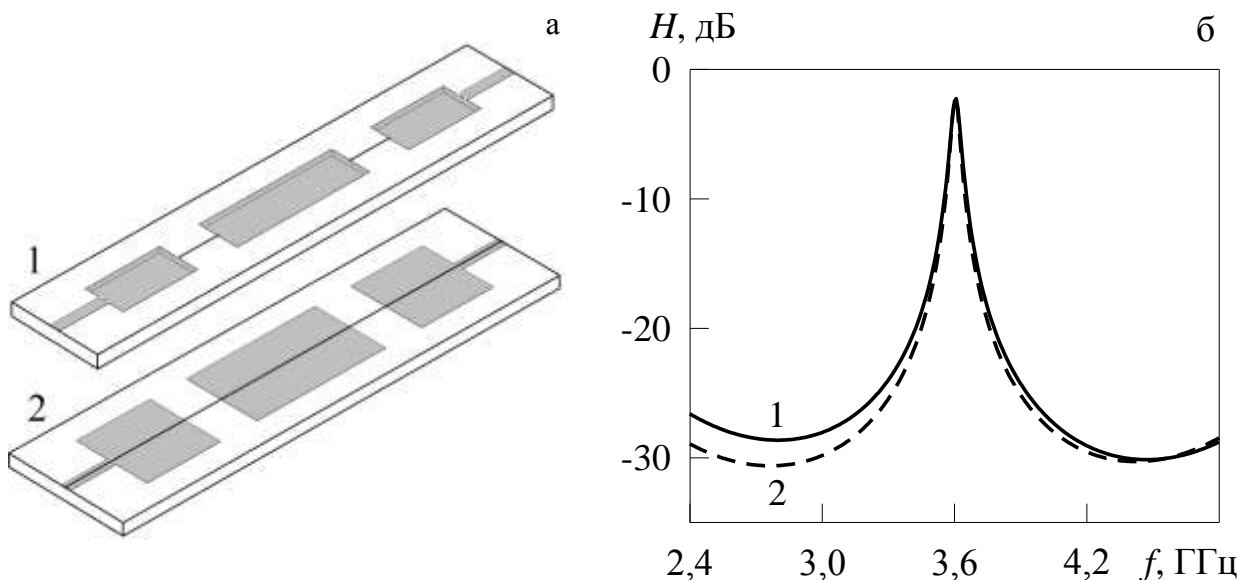


Рис.8. Вузькосмугові фільтри (а) на основі три- (1) та одновимірних (2) неоднорідностей та їх амплітудно-частотні характеристики (б).

Матеріал основи Rogers RO3010i з параметрами: $\epsilon = 10,2$, $\text{tg}\delta = 0,0023$, $s = 1,28$ мм, $t = 0,035$ мм. Параметри фільтра: $w = 1,0$ мм (50 Ом), довжина v -ділянок 4,0 мм, діаметр провідника 0,1 мм, $s' = 0,72$ мм. Значення a і b фільтра, ширина основи, довжина трансформуючих неоднорідностей по

краях та довжина центральної ділянки для фільтрів 1 і 2 на рис. 8, а дорівнюють відповідно: 36,76 мм і 4 мм та 38,20 мм і 8 мм; 9 мм і 13 мм; 7,57 мм і 8 мм; 13,62 мм і 14,20 мм. Наведено оптимальні параметри фільтра 1, які уточнювались в рамках комп'ютерного експерименту з метою вирівнювання смуг подавлення з обох боків.

Фільтрами 1 і 2 на рис. 8, а відповідають характеристики на рис. 8, б.

Використання ЕК-*n*-неоднорідностей глибиною $0,5s$ дозволило зменшити ширину фільтра вдвічі при незначному збільшенні рівня подавлення (на 1,9 дБ) зі сторони нижніх частот. Величина внесених втрат для фільтрів 1 і 2 на рис. 8, а відповідно дорівнює 2,27 дБ і 2,30 дБ.

Структури з двовимірними неоднорідностями на сигнальній поверхні дозволяють зберегти конструктивно-технологічні параметри традиційних МСЛ-фільтрів. Такі неоднорідності використовують в ЕК з періодичною зміною ширини провідника, а також як резонатори круглої форми [11].

Порівнюємо характеристики фільтрів на основі запропонованих тривимірних ЕК-*n*-неоднорідностей та відомих двовимірних МСЛ-неоднорідностей (рис. 9, а) [10]. Конструктивні параметри фільтра такі ж, як і для фільтра на рис. 8.

Значення внесених втрат для фільтрів 1 і 2 на рис. 9, а дорівнюють відповідно 2,28 дБ і 2,02 дБ. Фільтрами на рис. 9, а відповідають характеристики 1 і 2 на рис. 9, б, які, як видно, добре узгоджуються між собою.

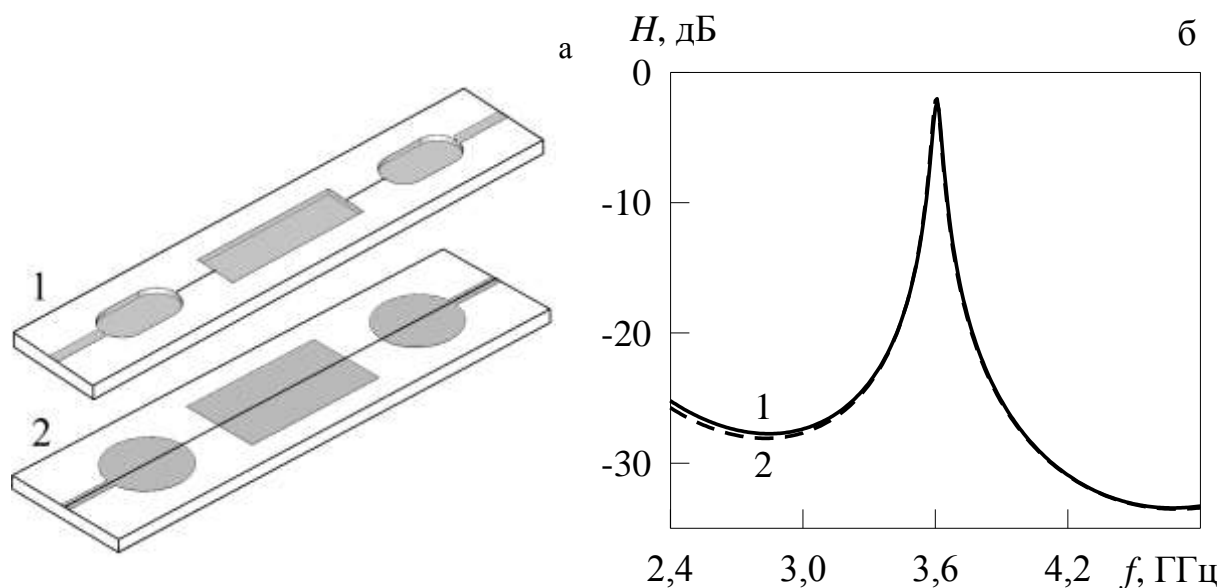


Рис.9. Вузкосмугові фільтри (а) на основі три- (1) та двовимірних (2) неоднорідностей та їх амплітудно-частотні характеристики (б).

Висновки

Використання запропонованих тривимірних низько- і високоімпедасних ЕК-неоднорідностей в структурі ЕК суттєво підвищують його ефективність у порівнянні з традиційними МСЛ. Так, для одного з розглянутих

ЕК значення T_{min} зменшується з -43 дБ до -73 дБ. При заданому рівні подавлення першої ЗЗ довжина ЕК, утвореного чергуванням n - і v -неоднорідностей, зменшується на 37 %. Задану ширину першої ЗЗ та значення T_{min} забезпечує інший ЕК на основі тривимірних ЕК-неоднорідностей, при цьому площа структури зменшуються на 40%. Перехід від одно- та двовимірних неоднорідностей до тривимірних n -неоднорідностей на сигнальній поверхні дозволяє зменшити ширину вузькосмугового ЕК-фільтра вдвічі.

Перелік посилань

1. Назарько А. И. Электромагнитные кристаллы на основе низкоомных неоднородностей / А. И. Назарько, Е. А. Нелин, В. И. Попсуй, Ю. Ф. Тимофеева // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, Вып. 5. – С. 142-143.
2. Назарько А. И. Высокоизбирательный электромагнитный кристалл / А. И. Назарько, Е. А. Нелин, В. И. Попсуй, Ю. Ф. Тимофеева // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, Вып. 4. – С. 138-139.
3. Radisic V. Novel 2-D photonic bandgap structures for microstrip lines / V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, T. Itoh // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1998. – Vol. 8, N 2. – pp. 69-71.
4. Rumsey I. Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits / I. Rumsey, M. Picket-May, P.K. Kelly // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1998. – Vol. 8, N 10. – pp. 336-338.
5. Weng L. H. An overview on defected ground structure / L. H. Weng, Y. C. Guo, X. W. Shi et al. // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 7, B. – pp. 173-189.
6. Беляев Б. А. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / Б. А. Беляев, А. С. Волошин, В. Ф. Шабанов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 6. – С. 694-701.
7. Пат. 58413 Україна, МПК Н 01 Р 3/00. Электромагнитнокристаллический пристрій / А. И. Назарько, Е. А. Нелин ; заявник НТУУ «КПІ». – № u201011608; заявка. 29.09.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7/2011. – 4 с.
8. Нелин Е. А. Высокоэффективные электромагнитно-кристаллические неоднородности / Е. А. Нелин, А. И. Назарько // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, Вып. 4. – С. 146-148.
9. Нелин Е. А. Резонансная и полосовая фильтрация на основе двухфазных кристаллоподобных структур / Е. А. Нелин, А. И. Назарько // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, Вып. 10. – С. 128-130.
10. Біденко П. С. Мікросмушковий фільтр на основі двовимірних неоднорідностей / П.С. Біденко, А.І. Назарько // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радиотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011. – № 46. – с. 111-115.
11. Hong J. S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications / J. S. Hong. – Wiley, 2011. – 655 p.

References

1. Nazar'ko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I. and Timofeeva Yu. F. (2011) Electromagnetic Crystals Based on Low-Impedance Inhomogeneities. Technical Physics, , vol. 56, no. 5, pp. 728-730.
2. Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I. and Timofeeva Yu. F. (2010) High-Selectivity Electromagnetic Crystal. Technical Physics, vol. 55, no. 4, pp. 569-570.
3. Radisic V., Qian Y., Coccioli R. and Itoh T. (1998) Novel 2-D photonic bandgap

structures for microstrip lines. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 8, no. 2, pp. 69-71.

4. Rumsey I., Picket-May M. and Kelly P.K. (1998) Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 8, no. 10, pp. 336-338.

5. Weng L. H., Guo Y. C., Shi X. W. and Chen X.-Q. (2008) An overview on defected ground structure. Progress In Electromagnetics Research B, vol. 7, pp. 173-189.

6. Belyaev B. A., Voloshin A. S. and Shabanov V. F. (2006) Analysis of Microstrip Analogues of Bandpass Filters on One-Dimensional Photonic Crystals. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 51, no. 6, pp. 653-659.

7. Nazarko A. I. and Nelin Ye. A. (2011) *Elektromahnitnokrystalichnyi prystrii* [Electromagneto-crystalline device] Patent UA, no. 58413. (in Ukrainian)

8. Nelin E. A. and Nazarko A. I. (2013) Effective electromagnetocrystalline inhomogeneities. Technical Physics, vol. 58, no. 4, pp. 612-614.

9. Nelin E. A. and Nazarko A. I. (2012) Resonance and band filtration on the basis of two-phase crystal-like structures. Technical Physics, vol. 57, no. 10, pp. 1449-1452.

10. Bidenko, P. S. and Nazarko, A. I. (2011) Microstrip filter based on 2D inhomogeneities. Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparatabuduv., no. 46, pp. 111-115. (in Ukrainian)

11. Hong J. S. (2011) *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, Second Edition*. Wiley, 655 p.

Назарько А. І. Порівняльний аналіз ефективності кристалоподібних та традиційних мікросмушкових структур. Проаналізовано обмеження ефективності традиційних мікросмушкових структур. Порівняно ефективність електромагнітних кристалів (ЕК) на основі запропонованих неоднорідностей з традиційними рішеннями на основі мікросмушкової лінії. Показано, що з використанням тривимірних неоднорідностей в структурі ЕК, площа зменшуються на 40%. На прикладі вузькосмугового фільтра порівняно ефективність запропонованих тривимірних низькоімпедансних ЕК-неоднорідностей зі сторони сигнального провідника з одновимірними неоднорідностями традиційної мікросмушкової лінії, показано, що ширина фільтра зменшується вдвічі. Комп'ютерне моделювання зроблено в середовищі CST Microwave Studio.

Ключові слова: електромагнітний кристал, кристалоподібна неоднорідність, тривимірне моделювання, мікросмушковий фільтр.

Назарько А. И. Сравнительный анализ эффективности кристаллоподобных и традиционных микрополосковых структур. Проанализированы ограничения эффективности традиционных микрополосковых структур. Сделано сравнение эффективности электромагнитных кристаллов (ЭК) на основе предложенных неоднородностей с традиционными решениями на основе микрополосковой линии. Показано, что с использованием трехмерных неоднородностей в структуре ЭК, площадь уменьшается на 40%. На примере узкополосного фильтра сделано сравнение эффективности предложенных трехмерных низкоимпедансных ЭК-неоднородностей со стороны сигнального проводника с одномерными неоднородностями традиционной микрополосковой линии, показано, что ширина фильтра уменьшается вдвое. Компьютерное моделирование сделано в среде CST Microwave Studio.

Ключевые слова: электромагнитный кристалл, кристаллоподобная неоднородность, трехмерное моделирование, микрополосковый фильтр.

Nazarko A. I. Comparative analysis of the crystal-like and traditional microstrip structures efficiency.

Introduction. Microstrip frequency selective devices are widely used in radio systems for various purposes. Crystal-like structures and devices that used for frequency selection of signals problems are described.

Crystal-like inhomogeneities. The types of inhomogeneities in microstrip devices are viewed. The limitations of the effectiveness of traditional microstrip structures are analyzed.

Electromagnetic crystals efficiency. The efficiency of the EC based on proposed inhomogeneities with traditional solutions based on microstrip line is compared. It is shown that by using three-dimensional inhomogeneities in the EC structure, area is reduced by 40%.

Comparison of the devices' characteristics. On an example of the narrow-band filter efficiency of the proposed three-dimensional low-impedance EC-inhomogeneities from the side of the signal conductor with one-dimensional inhomogeneities of traditional microstrip line are compared. It is shown that the filter width reduced in half.

Conclusions. Using the proposed three-dimensional low-and high-impedance EC-inhomogeneities in the structure of EC increases its efficiency in comparison with traditional microstrip line. Thus, value of T_{min} decreases from -43 dB to -73 dB for one of the considered ECs. The transition from single- and two-dimensional inhomogeneities to three-dimensional low-impedance inhomogeneities from the side of the signal conductor reduces the width of EC-filter twice.

Keywords: electromagnetic crystal, crystal-like inhomogeneity, 3D-simulation, microstrip filter.