

МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.372.061

МІНІАТЮРНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КРИСТАЛІВ

*Біденко П. С.; Назарько А. І.; Нелін Є. А., д.т.н., професор; Попсуй В. І.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут», Київ, Україна*

MINIATURE DEVICES BASED ON ELECTROMAGNETIC CRYSTALS

*Bidenko P. S.; Nazarko A. I.; Nelin E. A., Doctor of Engineering, Professor; Popsui V. I.
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Вступ

Кристалоподібні структури, що характеризуються особливими спектральними властивостями, широко досліджують для пристроїв обробки сигналів. Один з нових напрямків в конструюванні мікросмужкових пристроїв, що розвивається найбільш інтенсивно, — застосування мікросмужкових електромагнітних кристалів (ЕК) [1]. Аналогія з природними кристалами обумовлена вузловою періодичністю кристалоподібних структур і тим, що у вузлах розташовані неоднорідності зі значним впливом на хвилю. Використовують такі конструктивні рішення хвильових ЕК-неоднорідностей: отвори різної форми в металізації, отвори в металізації і наскрізні або ненаскрізні отвори в діелектричній основі [2], ненаскрізні металізовані отвори в діелектричній основі [3]; наскрізні або ненаскрізні отвори в діелектричній основі, заповнені діелектричним матеріалом з діелектричною проникністю, відмінною від діелектричної проникності основи.

Як ЕК, так і окремі ЕК-неоднорідності мають високу частотну вибірність, що дозволяє на їх основі реалізувати ефективні мініатюрні частотно-вибірні пристрої.

Метою статті є опис умов суттєвого зменшення габаритів пристроїв на основі електромагнітних кристалів формуванням спеціальної хвильової траєкторії.

Мініатюрні електромагнітні кристали

Мініатюризація мікросмужкових пристроїв при використанні ЕК або окремих ЕК-неоднорідностей ґрунтується на суттєвому розширенні діапазону можливих хвильових імпедансів конструктивних елементів структури у порівнянні з традиційними рішеннями. Подальше зменшення розмірів можливе при більш складній імпедансній залежності структури у порівнянні з природним кристалом. Так, якщо імпедансна залежність двофазна,

габарити ЕК менші приблизно вдвічі [4]. Розглянемо ще одну можливість зменшення габаритів ЕК — за рахунок формування спеціальної хвильової траєкторії.

У конструкціях ЕК хвильова траєкторія зазвичай прямолінійна. Відоме конструктивне рішення, що дозволяє зменшити розміри мікросмужкових пристроїв, — виконання сигнального провідника у формі меандру, який формує і відповідну хвильову траєкторію. В роботі запропоновані ЕК з хвильовою траєкторією у вигляді взаємопов'язаних п-подібних петель, що охоплюють неоднорідності (рис. 1). Така петля ефективніша петлі меандру, оскільки на її окремих відрізках хвиля поширюється у напрямку, протилежному основному. ЕК-неоднорідності виконано високоімпедансними (high-impedance, h -тип) у вигляді наскрізних отворів з дротяним навісним провідником [2]; хвильовий опір мікросмужкового провідника

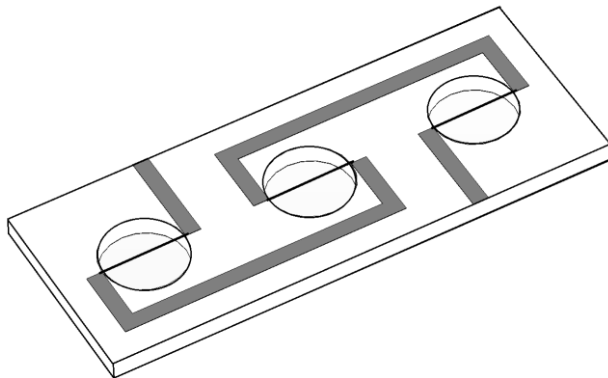


Рис. 1. Мініатюрний ЕК з h -неоднорідністю

— 50 Ом. При однакових значеннях діаметру неоднорідностей та відстані між ними запропонована структура приблизно в 2,4 і в 1,5 рази коротша структур з прямолінійною і у формі меандру хвильовою траєкторією.

На рис. 2 наведено розраховані характеристики ЕК з запропонованою і прямолінійною хвильовими траєкторіями (відповідно криві 1 і 2; тут $F = f/f_0$, f_0 — частота мінімуму коефіцієнта проходження T_{min}).

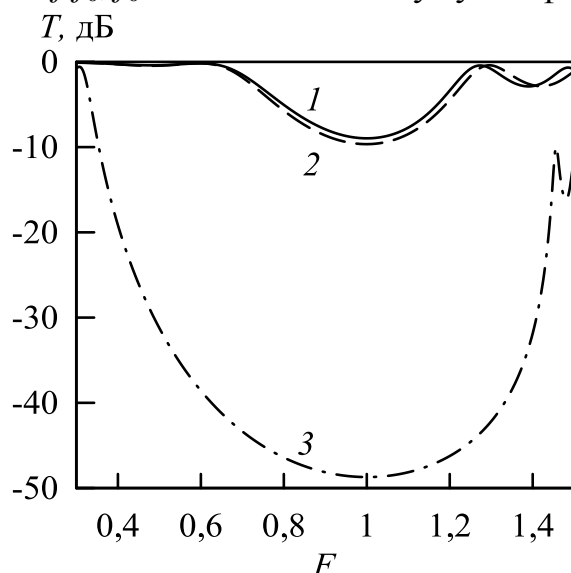


Рис. 2. Характеристики проходження ЕК

влення ΔF для характеристик 1 і 2 відповідно дорівнюють 1,88 ГГц і 1,87 ГГц, $-9,0$ дБ і $-9,6$ дБ, 67% і 69%. При практично однакових характе-

охоплюють неоднорідності (рис. 1). Така петля ефективніша петлі меандру, оскільки на її окремих відрізках хвиля поширюється у напрямку, протилежному основному. ЕК-неоднорідності виконано високоімпедансними (high-impedance, h -тип) у вигляді наскрізних отворів з дротяним навісним провідником [2]; хвильовий опір мікросмужкового провідника

Параметри ЕК: довжина $a = 36$ і 82 мм, ширина $b = 14$ мм, число отворів 3, діаметр отвору $d = 6$ мм, відстань між отворами 6 і 29 мм, ширина мікросмужкового провідника $w = 1,1$ мм, діаметр навісного провідника 0,1 мм. Матеріал основи — Rogers RO3010, товщина діелектрика 1,28 мм, відносна діелектрична проникність 10,2, тангенс кута діелектричних втрат 0,0023 на частоті 10 ГГц, товщина металізації 0,035 мм. Значення f_0 і T_{min} , а також відносна ширина смуги пода-

ристикях розміри запропонованої структури в 2,3 рази менші.

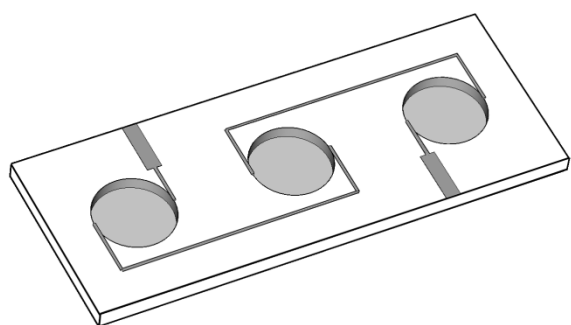


Рис. 3. Мініатюрний ЕК з l - і h -неоднорід-ностями

h -неоднорідностей — відрізків вузького сигнального провідника. Такому ЕК відповідає характеристика 3 на рис. 2. Параметри ЕК такі ж, як і наведені вище; глибина отвору $t = 1$ мм, ширина вузького сигнального провідника $w' = 0,1$ мм. Значення f_0 , T_{min} і ΔF дорівнюють 2,16 ГГц, $-48,7$ дБ і 115 %.

Вузькосмуговий ЕК-фільтр

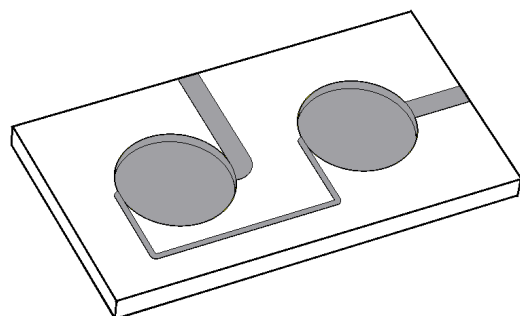


Рис. 4. Вузькосмуговий ЕК

Розглянемо використання запропонованої конструктивної особливості формування хвильової траєкторії на прикладі вузькосмугового ЕК-фільтра, реалізованого за схемою резонатора Фабрі-Перо. Резонаторна порожнина фільтра, на відміну від звичайної прямолінійної, виконана п-подібною (рис. 4). Параметри фільтра:

$$a = 22 \text{ мм,}$$

$b = 12$ мм, $d = 6$ мм, довжина резонаторної порожнини і її коротких відрізків дорівнюють 18,4 і 4,2 мм, $w = 1,1$ мм, $w' = 0,1$ мм, $t = 0,6$ мм. Матеріал підкладки — Rogers RO3010.

Особливості моделювання. ЕК — складні за геометрією та граничними умовами тривимірні (3D) структури, для моделювання яких використовують 3D електромагнітні моделі на основі методів скінченного інтегрування (finite integration technique, FIT) або скінченних елементів. Для дослідження ЕК необхідно використовувати метод, що увібрав у себе більшість переваг інших 3D-методів. Для цих задач найкраще підходить FIT, що не обмежений формою сітки та, на відміну від інших методів, дозволяє виконувати аналіз як у часовій, так і у частотній областях. Для моделювання структур використано найбільш розвинений програмний пакет, в якому реалізовано FIT — CST Microwave Studio (MWS).

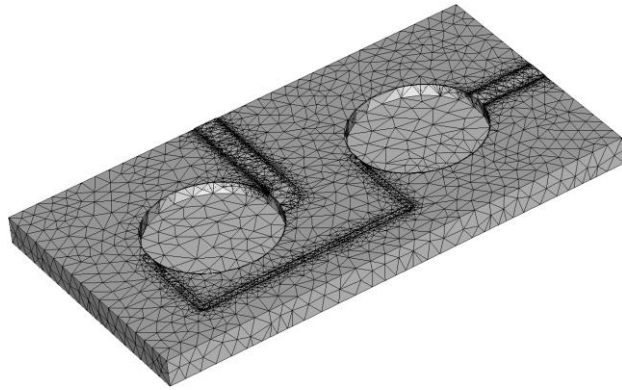


Рис. 5. Сіткова модель вузькосмугового ЕК з тетраедральним типом чарунок

ральний (рис. 5). У тетраедральній сітці при однаковій похибці розрахунку у порівнянні з гексагональною кількість чарунок значно менша, що суттєво зменшить час розрахунку. Однак при цьому необхідний великий об'єм оперативної пам'яті (не менше 4 ГБ).

2. Необхідна складова візуальної моделі MWS — вхідний і вихідний хвилеводні порти, які забезпечують збудження та поглинання електромагнітного поля. Оскільки в традиційних пристроях, а також в розглянутих в роботі ЕК-пристроїв на основі низькоімпедансних неоднорідностей заземлена поверхня екранує електромагнітне поле, порт обмежений цією поверхнею. У конструкціях на основі високоімпедансних ЕК-неоднорідностей екранування порушується, тому порт необхідно розміщувати і за межами заземленої поверхні симетрично відносно сигнальної поверхні або розширити знизу область моделювання, щоб звести до мінімуму вплив граничних умов на результати моделювання.

3. У візуальних моделях ЕК-пристроїв необхідно враховувати конструктивно-технологічні елементи (наприклад, пайку, рис. 6), оскільки ці елементи можуть помітно впливати на значення f_{min} і T_{min} .

На рис. 7 наведено експериментальну (1) і розрахункову (2) амплітудно-частотні характеристики фільтра. Експериментальну характеристику виміряно за допомогою аналізатора Rohde & Schwarz FSH8 Spectrum Analyzer. Експериментальні та розрахункові значення резонансної частоти, ширини смуги пропускання за рівнем -3 дБ і внесених втрат відповідно дорівнюють 3,74 ГГц і 3,83 ГГц, 180 МГц і 100 МГц, -3 дБ та $-1,7$ дБ. Експериментальне значення ширини смуги більше внаслідок більших, ніж розрахункові, внесених втрат. У порівнянні з конструкцією з прямолінійною резонаторною порожниною розміри фільтра в 1,5 рази менші.

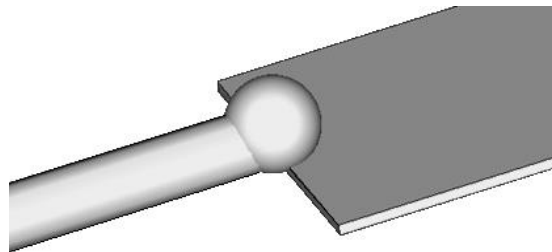


Рис. 6. Урахування пайки у візуальній моделі

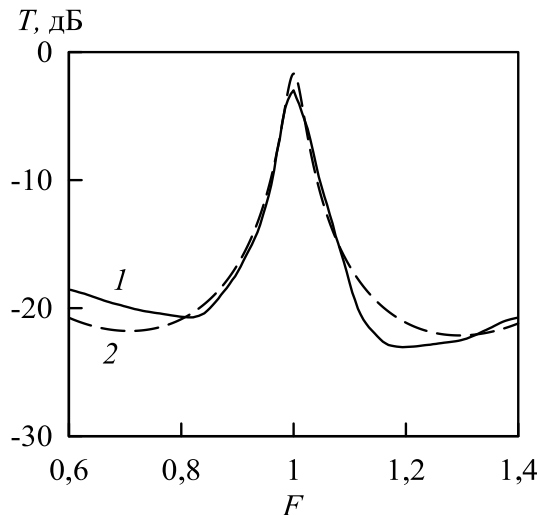


Рис. 7. Частотні характеристики вузькосмугового ЕК

Висновки

Формування спеціальної хвильової траєкторії з поширенням хвилі на окремих відрізках у напрямку, протилежному основному, дозволяє значно зменшити розміри ЕК-структур. Використання двох ЕК-неоднорідностей і ускладненої хвильової траєкторії достатньо для створення мініатюрних вузькосмугових фільтрів.

Література

1. Hong J. S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. / Hong J. S., Lancaster M. J. — NY. : Wiley, 2001 — 457 p.
2. Назарько А. И. Высокоизбирательный электромагнитный кристалл / Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И. Тимофеева Ю. Ф. // ЖТФ. — 2010. — Т. 80. Вып. 4. — С. 138—139.
3. Назарько А. И. Электромагнитные кристаллы на основе низкомных неоднородностей / Назарько А. И. / Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И. Тимофеева Ю. Ф. // ЖТФ. — 2011. — Т. 81. Вып. 5. — С. 142—143.
4. Назарько А. И. Двухфазный электромагнитный кристалл / Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. // ПЖТФ — 2011. — Т. 37, Вып. 4. — С. 81—86.

References

1. Hong J. S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. / Hong J. S., Lancaster M. J. — NY. : Wiley, 2001 — 457 p.
2. Nazarko A. I. High-selectivity electromagnetic crystal / Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I., Timofeeva Yu. F // Technical Physics. — 2010. — Vol. 55. — Issue 4. — P. 569—570.
3. Nazarko A. I. Electromagnetic crystals based on low-impedance inhomogeneities / Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I., Timofeeva Yu. F // Technical Physics. — 2011. — Vol. 56. — Issue 5. — P. 728—730.
4. Nazarko A. I. Two-phase electromagnetic crystal / Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I., Timofeeva Yu. F. // Technical Physics Letters. — 2011. — Vol. 37. — Issue 2. — P. 185—187.

Біденко П. С., Назарько А. І., Нелін Є. А., Попсуй В. І. **Мініатюрні пристрої на основі електромагнітних кристалів.** Запропоновано метод зменшення габаритів електромагнітних кристалів (ЕК) формуванням хвильової траєкторії у вигляді взаємопов'язаних *n*-подібних петель, що охоплюють неоднорідності. При однакових значеннях діаметру неоднорідностей та відстані між ними запропонована структура приблизно в 2,4 і в 1,5 рази коротша структур з прямолінійною і у формі меандру хвильовою траєкторією. Розглянуто особливості моделювання ЕК-фільтра. Представлено експериментальну та теоретичну амплітудно-частотні характеристики мінімізованого вузькосмугового ЕК-фільтра, реалізованого за схемою резонатора Фабрі-Перо.

Ключові слова: електромагнітний кристал, електромагнітнокристалічна неоднорідність, 3D-моделювання, мікросмужковий вузькосмуговий фільтр

Биденко П. С., Назарько А. И., Нелин Е. А., Попсуй В. И. **Миниатюрные устройства на основе электромагнитных кристаллов.** Предложен метод уменьшения габаритов электромагнитных кристаллов (ЭК) формированием волновой траектории в виде взаимосвязанных *n*-подобных петель, охватывающих неоднородности. При одинаковых значениях диаметра неоднородностей и расстояния между ними предложенная структура приблизительно в 2,4 и в 1,5 раза короче структур с прямолинейной и в форме меандра траекторией. Рассмотрены особенности моделирования ЭК-фильтра. Представлены экспериментальная и теоретическая амплитудно-частотные характеристики минимизированного узкополосного ЕК-фильтра, реализованного по схеме резонатора Фабри-Перо.

Ключевые слова: электромагнитный кристалл, электромагнитнокристаллическая неоднородность, 3D-моделирование, микрополосковый узкополосный фильтр.

Bidenko P. S., Nazarko A. I., Nelin E. A., Popsui V. I. **Miniature devices based on electromagnetic crystals.**

Introduction. Crystal-like structures with specific spectral characteristics are widely investigated for signal processing devices. Brief review of electromagnetic crystals (EC) and EC-inhomogeneities is presented.

Miniature EC. Few methods to miniaturize EC are presented. A new method for reducing the size of electromagnetic crystals (EC) due to formation of the wave trajectory in the form of interconnected u-shaped loops, covering inhomogeneities is proposed and tested.

Narrow-band EC-filter. Miniature EC narrow-band filter based on the scheme of Fabry-Perot cavity is designed and constructed. The experimental and calculated values of the resonant frequency, bandwidth at -3 dB level and insertion loss are respectively 3.74 GHz and 3.83 GHz, 194 MHz and 100 MHz, -3 dB and -1.7 dB. In comparison with straight resonator area structure size is reduced by 1.5 times. Measured and simulated results are presented. The features of 3D-simulation of the novel EC are presented.

Conclusions. Two EC-inhomogeneities with special wave trajectory permit to design a miniature narrow-band filters.

Keywords: electromagnetic crystal, electromagneticcrystal inhomogeneity, 3D-simulation, microstrip narrow-band filter.