

УДК 537.86

МІКРОСМУЖКОВИЙ СМУГОПРОПУСКАЮЧИЙ ФІЛЬТР З ПОДВІЙНОЮ ПЕРЕСТРОЙКОЮ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК¹

*Мовчан М. М., інженер; Попов М. О., к. ф.-м. н., науковий співробітник
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
maxim_popov@univ.kiev.ua*

MICROSTRIP BAND-PASS FILTER WITH DUAL TUNING OF WORKING CHARACTERISTICS

*Movchan M. M., engineer; Popov M. O., Ph.D., researcher
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, maxim_popov@univ.kiev.ua*

Вступ

Базовим елементом для створення надвисокочастотних (НВЧ) частотно-селективних компонентів сучасних радіотехнічних засобів зв'язку та телекомунікації є діелектричні резонатори (ДР). До основних параметрів ДР відносяться резонансна частота та власна добротність, значення яких залежать від діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат матеріалу, з якого виготовлений ДР, форми та розмірів резонатора, а також оточуючих ДР металевих та діелектричних елементів НВЧ конструкції [1].

Використання в НВЧ фільтрах перестроюваних, бажано електронним способом, компонент призводить до суттєвого розширення функціональних можливостей таких пристроїв [2]. Так, можливість перестройки центральної частоти частотно-селективних приладів дозволяє зменшити масо-габаритні характеристики та вартість приймально-передавальної апаратури за рахунок заміни кількох фільтрів з фіксованими параметрами на один перестроюваний, а також створити нові пристрої аналогової обробки сигналу, частотні характеристики яких будуть адаптуватись до характеристик сигналу, який обробляється.

Перестройка характеристик ДР традиційно виконується шляхом його об'єднання з матеріалом, діелектричну або магнітну проникність якого можна змінювати зовнішнім впливом. При перестройці ДР електричним полем, до їх складу може входити сегнетоелектрик з керованою електричним полем діелектричною проникністю [3] або зосереджені елементи на основі варакторів [4]. Перевагами перестройки ДР електричним полем, у порівнянні, наприклад, з магнітною перестройкою, є малі інерційність та енергоспоживання. Однак практичне застосування перестройки резонансної частоти ДР електричним полем з використанням сегнетоелектричних

¹ Електронний варіант статті: <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1082>

чи напівпровідникових елементів утруднено через сильне зменшення (іноді на порядок) його власної добротності.

Альтернативний спосіб перестройки резонансних частот ДР реалізується шляхом взаємодії електромагнітного поля резонатора з намагніченим феритовим зразком, в якому збуджуються магнітостатичні типи коливань. При цьому виникають зв'язані електромагнітно-спінові коливання, які перестроюються зовнішнім магнітним полем [5]. Добротність такого композитного резонатора в режимі зв'язаних коливань приймає проміжні значення між добротністю діелектричного та магнітостатичного резонаторів [6]. До недоліків магнітної перестройки ДР варто віднести інерційність та великі керуючі потужності.

З метою усунення недоліків, притаманних перестройці резонансних частот твердотільних резонаторів магнітним та електричним полями, зараз проводяться дослідження, пов'язані з вивченням композитних матеріалів на основі планарних структур ферит/п'єзоелектрик, які демонструють магнітоелектричні властивості і допускають подвійну перестройку резонансних частот магнітостатичних коливань як магнітним, так і електричним полями [7]. Перевагами управління характеристиками композитних резонаторів зі структурою ферит/п'єзоелектрик електричним полем є низьке енергоспоживання та висока швидкодія. Однак такі резонатори характеризуються суттєво меншим діапазоном електричної перестройки частоти, в порівнянні з перестройкою постійним магнітним полем. Застосування керуючого елемента на основі планарної структури епітаксійна плівка залізоітрієвого гранату (ЗІГ)/п'єзоелектрик цирконат-титанат свинцю для подвійної перестройки статичними магнітним та електричним полями резонансних частот ДР досліджено в роботі [8].

Метою статті є теоретичне дослідження нової конструкції мікросмужкового смугопропускаючого НВЧ фільтра на основі ДР з керуючим елементом вигляді планарної структури ферит/п'єзоелектрик, який може бути використаний для частотної селекції сигналу на трьох несучих частотах з можливістю подвійної перестройки робочих частот як магнітним полем, так і шляхом пружної механічної деформації епітаксійної феритової плівки, що входить до складу керуючого елемента.

Постановка задачі

Запропоновано конструкцію смугопропускаючого НВЧ фільтра, що включає в себе дві ортогональні мікросмужкові лінії передачі, елемент зв'язку в вигляді ДР з НВЧ кераміки з малим тангенсом кута діелектричних втрат та керуючий елемент на основі епітаксійної плівки ЗІГ на підкладці з немагнітного діелектрика галій-гадолінієвого гранату (ГГГ). З метою уникнення втрат на випромінювання фільтр було розміщено в екрануючій металевій коробці. Керування робочими характеристиками фільтра може здійснюватись як варіюванням значення зовнішнього магнітного по-

ля, так і шляхом створення пружної деформації епітаксійної плівки ЗІГ. Для теоретичного дослідження робочих характеристик фільтра було використано моделювання за методом скінченних елементів в пакеті програм HFSS.

Конструкція НВЧ фільтра представлена на рис. 1а (геометричні пропорції не збережено). Смугопропускаючий фільтр складається з двох ортогональних між собою мікросмужкових ліній 5 шириною 3,15 мм, розміщених на діелектричній підкладці 1 з матеріалу Duroid, що має товщину 1,02 мм та діелектричну проникність $\epsilon=2,2$. Напрямок каналування електромагнітних хвиль через НВЧ фільтр показано на рис. 1а стрілками.

Елементом зв'язку між мікросмужковими лініями виступає циліндричний ДР 2 з радіусом 2,75 мм та висотою 2,6 мм. Матеріал з якого виготовлений ДР – термостабільна кераміка на основі суміші окисів $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SnO}_2$ [9]. В ході моделювання було прийнято, що ДР має діелектричну проникність $\epsilon=38$ та тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon=2\times 10^{-4}$. Керуючий елемент смугопропускаючого фільтра виконано в вигляді диску 4 радіусом 2,75 мм з епітаксійної плівки ЗІГ товщиною 23,6 мкм на підкладці 3 з ГГГ товщиною 0,48 мм. Зверху елемент зв'язку НВЧ фільтра обмежує поверхня металізованої пластини п'єзoeлектрика 6, який і спричиняє її пружну деформацію. Вважалося, що п'єзoeлектрик покрито сріблом з питомою провідністю $6,25\times 10^7$ См/м.

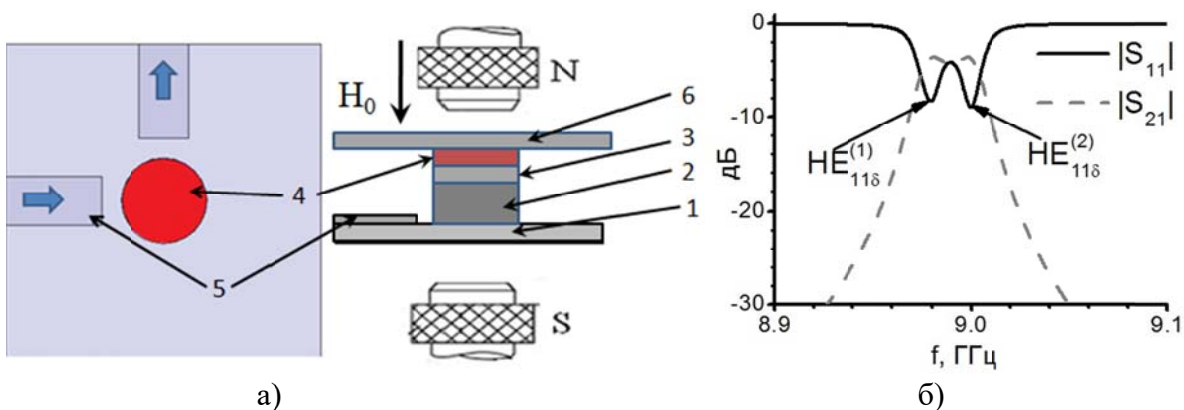


Рис. 1. Смугопропускаючий фільтр на основі ДР з керуючим елементом на основі епітаксійної плівки ЗІГ а) вигляд зверху та вигляд збоку, б) амплітудно-частотна характеристика фільтра при відсутності зовнішнього магнітного поля.

В ході розрахунків було прийнято, що епітаксійна плівка ЗІГ вирощена на зрізі (111) монокристалу ГГГ та характеризується наступними магнітними властивостями: намагніченість насичення $4\pi M_s=1750$ Гс, поле кубічної анізотропії $H_k=-55$ Е, поля одновісної анізотропії першого $H_{u1}=-50$ Е та другого $H_{u2}=45$ Е порядків [10], ширина смуги ФМР $\Delta H=0,5$ Е [11]. Тангенс кута діелектричних втрат та діелектрична проникність епітаксійної плівки ЗІГ прийняті такими ж як в полікристалічних зразків ЗІГ, а саме $\text{tg}\delta_\epsilon=2\times 10^{-4}$ та $\epsilon=15,9$ [12]. Діелектрична проникність ГГГ прийнята рівною

$\varepsilon=12,4$, а тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon=2,6\times 10^{-3}$, згідно [13].

При моделюванні вважалося, що зовнішнє магнітне поле H_0 прикладено вздовж нормалі до поверхні епітаксійної плівки ЗІГ (рис. 1а). При цьому в епітаксійній плівці ЗІГ можуть збуджуватися прямі об'ємні магнітостатичні коливання (ПОМСК). Важливо зазначити, що при розгляді магнітостатичних коливань в епітаксійних феритових плівках принципово важливим є врахування поля магнітної кристалографічної анізотропії. В випадку ПОМСК наявність магнітної анізотропії призводить до появи адитивних доданків до магнітного поля, яке входить в рівняння для резонансних частот [10]. Тоді в тензорі магнітної проникності, отриманому для випадку однорідного ізотропного фериту, слід зробити заміну

$$H_0 \rightarrow H_0 + H_{u1} + H_{u2} - \frac{4}{3}H_k, \quad (1)$$

де H_k, H_{u1}, H_{u2} – поля магнітної кристалографічної анізотропії, визначені вище.

В свою чергу, пружна деформація епітаксійної плівки ЗІГ призводить до появи магнітострикційного внеску $\Delta H_{u1}(\sigma)$ в поле одновісної магнітної кристалографічної анізотропії першого порядку [14]: $\Delta H_{u1} = -3\sigma\lambda_{111} / M_s$, де σ – пружна напруга в феритовій плівці, λ_{111} – константа магнітострикції ЗІГ.

Таким чином, виходячи з вищенаведених співвідношень, магнітострикційний внесок $\Delta H_{u1}(\sigma)$ в поле анізотропії враховувався при розрахунках в пакеті програм HFSS як адитивний доданок до внутрішнього магнітного поля в епітаксильній плівці ЗІГ. Як показали експериментальні дослідження та теоретичні оцінки, для типових значень параметрів феритової плівки та п'єзоелектрика цілком досяжними є значення магнітострикційного внеску в поле одновісної анізотропії в діапазоні $\Delta H_{u1}=\pm 50$ Е [15].

Результати моделювання

Теоретичне дослідження можливості подвійного перестроювання робочих характеристик смугопропускаючого фільтра на основі композитного резонатора за допомогою магнітного поля та зміни магнітострикційного вкладу в поле магнітної кристалографічної анізотропії плівки ЗІГ проходило в два етапи. На першому етапі, в пакеті програм HFSS були розраховані залежності елементів матриці розсіяння фільтра від частоти для ряду значень магнітного поля в області гібридизації електромагнітних коливань в ДР та ПОМСК в розмірному магнітостатичному резонаторі, утвореному намагніченою плівкою ЗІГ. Далі за отриманими даними побудовано залежності робочих частот смугопропускаючого фільтра від значення зовнішнього магнітного поля.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра за відсутності магнітного поля зображена на рис. 1б. В цьому випадку залежність коефіціє-

нта передачі фільтра від частоти має двогорбу характеристику, яка є наслідком часткового зняття частотного виродження коливань типу $HE_{11\delta}$ [8], спричинене порушенням симетрії оточення ДР внаслідок присутності мікросмужок. При цьому в ДР збуджуються два близькі за частотою коливання $HE_{11\delta}^{(1)}$ та $HE_{11\delta}^{(2)}$.

При поміщенні фільтра в магнітне поле в епітаксійній плівці ЗІГ можуть збуджуватися магнітостатичні коливання. В певному діапазоні значень магнітного поля має місце гібридизація двох найнижчих за частотою коливань ДР $HE_{11\delta}^{(1)}$ та $HE_{11\delta}^{(2)}$ та основної моди ПОМСК в магнітостатичному резонаторі, що спричиняє розштовхування їх резонансних частот. Залежність резонансних частот зв'язаних коливань резонатора від магнітного поля в області гібридизації подано на рис. 2а. Можливість перестроювання АЧХ смугопрускаючого фільтра магнітним полем в області гібридизації продемонстровано на рис. 2б.

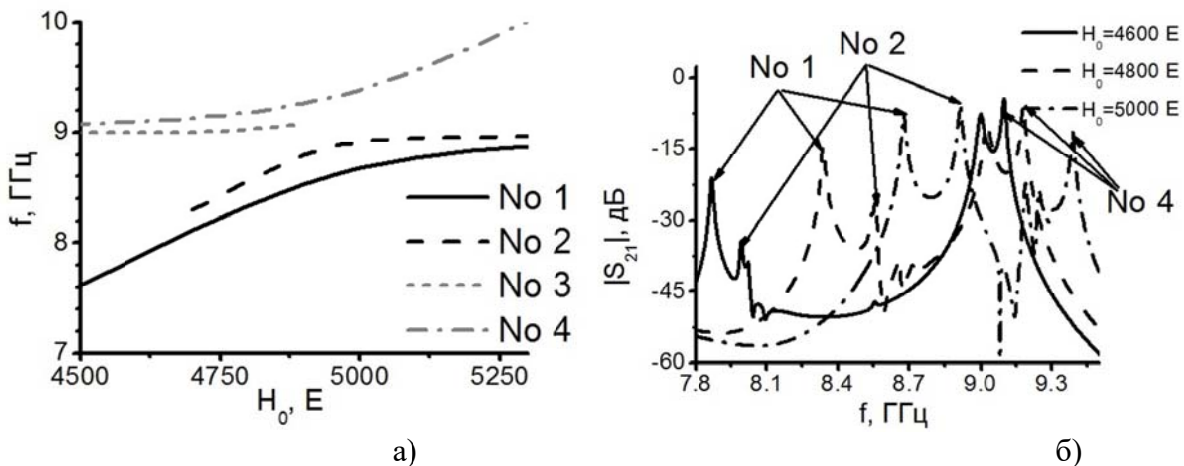


Рис. 2. а) Залежність резонансних частот композитного резонатора від магнітного поля, б) коефіцієнт передачі $|S_{21}|$ фільтра як функція частоти для ряду значень магнітного поля.

Варто відмітити, що в області гібридизації спостерігається 4 моди зв'язаних коливань. З практичної точки зору представляє інтерес перестроювання робочих частот фільтра магнітним полем для мод зв'язаних коливань, позначених на рис. 2а як №1, №2 та №4. Зазначимо, що варіювання зовнішнього магнітного поля дозволяє перестроювати робочі частоти мод №1, №2 та №4 в досить широкому діапазоні $\Delta f \sim 1$ ГГц.

Далі, шляхом моделювання в пакеті програм HFSS, було досліджено залежності коефіцієнта передачі фільтра $|S_{21}|$ від частоти для ряду значень магнітострикційного вкладу ΔH_{u1} в поле одновісної магнітної анізотропії першого порядку за сталого значення магнітного поля H_0 . Розрахунок при магнітному полі $H_0 = 5000$ E наведено на рис. 3.

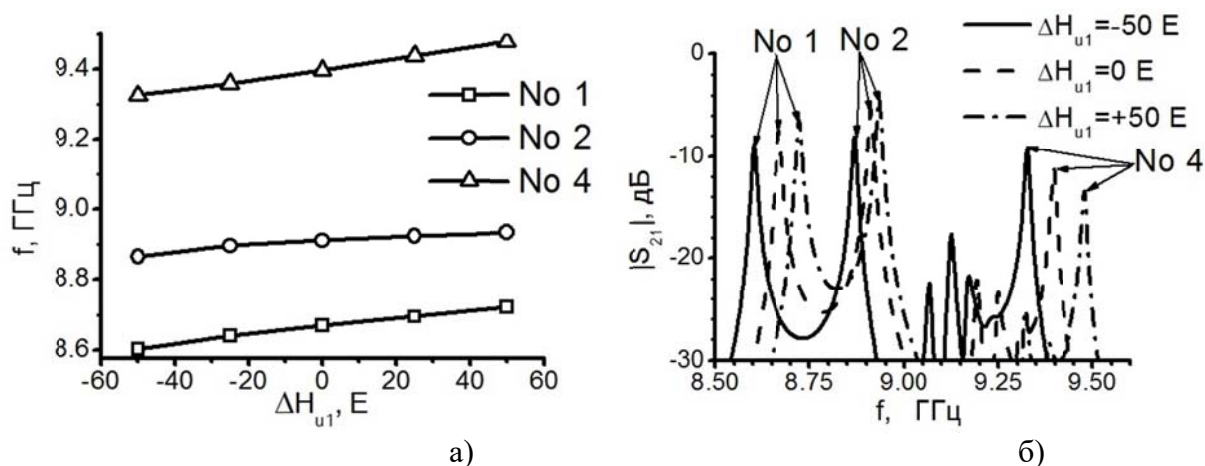


Рис. 3. а) Залежність частоти зв'язаних коливань від магнітострикційного вкладу ΔH_{u1} в поле одновісної магнітної анізотропії першого порядку, б) коефіцієнт передачі $|S_{21}|$ фільтра як функція частоти для ряду значень ΔH_{u1} при магнітному полі $H_0=5000$ Е.

На рис. 3а видно, що за рахунок магнітострикційного вкладу ΔH_{u1} в поле магнітної анізотропії можна досягти суттєвої перестройки робочих частот смугопропускаючого фільтра, наприклад при діапазоні варіювання поля анізотропії $\Delta H_{u1}=\pm 50$ Е в околі значення магнітного поля $H_0=5000$ Е маємо діапазон перестройки частоти моди №1 – $\Delta f=120$ МГц, моди №2 – $\Delta f=66$ МГц та моди №4 – $\Delta f=153$ МГц. При цьому на рис. 3б ми бачимо, що коефіцієнт передачі $|S_{21}|$ смугопропускаючого фільтра на резонансних частотах мод №1 та №2 в усьому діапазоні перестройки залишається більшим за -9 дБ, а для моди №4 змінюється від -9,2 дБ на частоті 9,325 ГГц до -13,4 дБ на частоті 9,478 ГГц.

Таким чином, пружня деформація епітаксійної плівки ЗГ дозволяє, за рахунок магнітострикційного вкладу в поле магнітної анізотропії, проводити швидко перестройку робочих частот смугопропускаючого фільтра на основі композитного магнітоелектричного резонатора діелектрик-ферит-п'єзоелектрик в вузькому діапазоні частот $\Delta f \sim 150$ МГц, в той час як варіювання зовнішнього магнітного поля дозволяє перестроювати робочі частоти в більш широкому діапазоні $\Delta f \sim 1$ ГГц, однак з суттєво меншою швидкістю.

Висновки

В роботі запропоновано та досліджено конструкцію мікросмушкового смугопропускаючого НВЧ фільтра на основі композитного магнітоелектричного резонатора, що забезпечує частотну селекцію на 3-х робочих частотах з можливістю перестройки всіх робочих частот, як шляхом зміни величини зовнішнього магнітного поля, так і за допомогою пружної деформації епітаксимальної феритової плівки, що входить до його складу. При цьому перестройка шляхом пружної деформації епітаксимальної феритової плівки здійснюється в діапазоні частот $\Delta f \sim 150$ МГц, та характеризується суттєво нижчим енергоспоживанням та більш високою швидкістю в порі-

внянні з традиційною перестройкою магнітним полем.

Перелік посилань

1. Ильченко М. Е. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гасанов и др.; Под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Mansour R. R. High-Q tunable dielectric resonator filters / R. R. Mansour / IEEE Microwave Magazine. – 2009. – Vol. 9. – P. 84 – 98.
3. Petrov P. K. Tunable dielectric resonator with ferroelectric element / P. K. Petrov, N. McN. Alford // Electronics letters. – 2001. – Vol. 37, № 17. – P. 1066-1067.
4. Virdee B. S. Current techniques for tuning dielectric resonators / B. S. Vierdee // Microwave Journal. – 1998. – Vol. 41, № 6. – P. 130-138.
5. Ильченко М. Е. Составной феррито-диэлектрический резонатор в волноводе / М. Е. Ильченко, Г. А. Мелков // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, Вып. 11. – С. 2288-2293.
6. Popov M. A. Coupled magnetostatic and electromagnetic oscillation in hexaferrite-dielectric heterostructures / M. A. Popov, I. V. Zavislyak, G. Srinivasan, V. V. Zagorodnii // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105, Iss. 8. – P. 083912 (4 pages).
7. Ce-Wen Nan Multiferoic magnitoelectric composites: historical perspective, status, and future directions / Ce-Wen Nan, M. I. Bichurin, S. Dong et al. // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103, Iss. 3. – P. 031101 (35 pages).
8. Movchan N. N. Dual electric and magnetic frequency tuning of coupled oscillations in a composite magnetodielectric resonator / N. N. Movchan, I. V. Zavislyak // Radioelectronics and communication systems. – 2014. – Vol. 57, Iss. 7. – P. 320-327.
9. Konishi Y. Microwave Integrated Circuits / Y. Konishi. – CRC Press., 1991. – 648 p.
10. Бобков В. Б. Радиоспектроскопия магнитостатических волн в эпитаксиальных ферритовых пленках / В. Б. Бобков, И. В. Зависляк, В. Ф. Романюк // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, №2. – С. 222-232.
11. Яковлев Ю. М. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике./ Ю. М. Яковлев, С. Ш. Генделев – М.: «Сов. радио», 1975. – 360 с.
12. Материалы, Феррогранаты, Феррошпинели, Гексаферриты, Горячепрессованные ферриты. - ОАО «НИИ «Феррит-Домен» [Электронный документ]. – Режим доступа: http://www.domen.ru/images/stories/prod/pdf/catalog_part8.pdf. – Название с экрана
13. Backer-Jarvis J. Dielectric and conductor-loss characterization and measurements on electronic packaging materials. NIST Technical note 1520 / J. Backer-Jarvis, M. D. Janezic, B. Riddle et al. – Boulder CO: National Institute of Standards, 2001. – 160 p.
14. Popov M. A. Mechanism of electric frequency tuning in composite resonators based on epitaxial ferrite film / M. A. Popov, I. V. Zavislyak // Technical Physics Letters. – 2012. – Vol. 38, № 9. – P. 865-868.
15. Shastry S. Microwave magnitoelectric effects in single crystal bilayer of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate – lead titanate / S. Shastry, G. Srinivasan, M. I. Bichurin, V.M. Petrov, A.S. Tatarenko // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 70, Iss. 6. – P. 064416 (6 pages).

References

1. Ilchenko M. E. eds., Vzyatychev V. F. and Gassanov L. G. (1989) Dielektricheskie rezonatory [Dielectric resonators], Moscow: Radio I Svyaz', 328 p. (in Russian)
2. Mansour R. R. (2009) High-Q tunable dielectric resonator filters, IEEE Microwave Magazine, Vol. 9, pp. 84–98.
3. Petrov P. K. and Alford N. McN. (2001) Tunable dielectric resonator with ferroelectric

element, Electronics letters, Vol. 37, № 17, pp. 1066-1067.

4. Virdee B. S. (1998) Current techniques for tuning dielectric resonators, Microwave Journal, Vol. 41, № 6, pp. 130-138.

5. Ilchenko M. E. and Melkov G. A. (1973) Sostavnoi ferrito-dielektricheskii rezonator v volnovode [Composite ferrite-dielectric resonator in waveguide], Radiotekhnika i elektronika, Vol. 18, № 11, P. 2288-2293. (in Russian)

6. Popov M. A., Zavislyak I. V., Srinivasan G. and Zagorodnii V. V. (2009) Coupled magnetostatic and electromagnetic oscillation in hexaferrite-dielectric heterostructures, J. Appl. Phys., Vol. 105, Iss. 8, P. 083912 (4 pages).

7. Ce-Wen Nan, Bichurin M. I., Dong S. et al. (2008) Multiferroic magnitoelectric composites: historical perspective, status, and future directions, J. Appl. Phys., Vol. 103, Iss. 3, P. 031101 (35 pages).

8. Movchan N. N. and Zavislyak I. V. (2014) Dual electric and magnetic frequency tuning of coupled oscillations in a composite magnetodielectric resonator, Radioelectronics and communication systems, Vol. 57, Iss. 7, pp. 320-327.

9. Konishi Y. (1991) Microwave Integrated Circuits, CRC Press., 648 p.

10. Bobkov V. B., Zavislyak I. V. and Romanyuk V. F. (2003) Microwave spectroscopy of magnetostatic waves in epitaxial ferrite films, Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 48, Iss. 2, pp. 196-206.

11. Yakovlev Yu. M. and Gendeleev S. Sh. (1975) Monokrystally ferritov v radioelektronike [Single crystals of ferrites in radio electronics], Moskov, Sov. Radio Publ., 360 p. (in Russian)

12. Materialy, Ferrogranaty, Ferrosphineli, Geksaferity, Goryachepressovannye ferrity [Materials, garnet, ferrosphinels, hexaferrites, hot-pressed ferrite]. OAO «NII «Ferrit-Domen». Available at: http://www.domen.ru/images/stories/prod/pdf/catalog_part8.pdf

13. Backer-Jarvis J., Janezic M. D., Riddle B. et al. (2001) Dielectric and conductor-loss characterization and measurements on electronic packaging materials. NIST Technical note 1520, Boulder CO: National Institute of Standards, 160 p.

14. Popov M. A. and Zavislyak I. V. (2012) Mechanism of electric frequency tuning in composite resonators based on epitaxial ferrite film, Technical Physics Letters, Vol. 38, № 9, pp. 865-868.

15. Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M. and Tatarenko A. S. (2004) Microwave magnitoelectric effects in single crystal bilayer of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate – lead titanate, Phys. Rev. B., Vol. 70, Iss. 6, P. 064416 (6 pages).

Мовчан М. М., Попов М. О. Мікросмужековий смугопрускаючий фільтр з подвійною перестройкою робочих характеристик. Розглянуто конструкцію НВЧ фільтра на основі діелектричного резонатора з планарною структурою немагнітний діелектрик/ епітаксійна феритова плівка/ п'єзоелектрик. Продемонстровано можливість подвійного перестроювання робочих характеристик фільтра як за допомогою зовнішнього магнітного поля, так і електричною напругою, за рахунок магнітострікційного вкладу в поле одновісної магнітної анізотронії епітаксійної феритової плівки.

Ключові слова: магнітоелектричний ефект, діелектричний резонатор, смугопрускаючий фільтр, подвійна перестройка.

Мовчан Н. Н., Попов М. А. Микрополосковый полосопропускающий фильтр с двойной перестройкой рабочих характеристик. Рассмотрено конструкцию СВЧ фильтра на основе диэлектрического резонатора с планарной структурой эпитакси-

альная немагнитный диэлектрик/ферритовая пленка/пьезоэлектрик. Продемонстрирована возможность двойной перестройки рабочих характеристик фильтра как с помощью магнитного поля, так и электрическим напряжением, за счет магнитоэлектрического вклада в поле одноосной магнитной анизотропии эпитаксиальной ферритовой пленки.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, диэлектрический резонатор, полосопропускающий фильтр, двойная перестройка.

Movchan M. M., Popov M. O. **Microstrip band-pass filter with dual tuning of working characteristics.**

Introduction. In recent years, there has been considerable interest in ferrite-piezoelectric composites for dual magnetic and electric field tunable microwave devices, such as resonators or filters. In this article a microstrip band-pass filter manufactured on the base of cylindrical dielectric resonator with tuning element, made from planar structure nonmagnetic dielectric/epitaxial ferrite film/piezoelectric which demonstrates magnetoelectric properties, is considered.

The results. Numerical calculations of the microstrip band-pass filter parameters have been done by finite element method in HFSS software suit. The possibility of dual tuning of filter's three working frequencies by varying the magnetic field and by voltage-induced changes in the magnetostrictive part of uniaxial first-order magnetic anisotropy of epitaxial ferrite film was shown. Proposed device allows low-speed magnetic field tuning in frequency range $\Delta f \sim 1$ GHz and high-speed electric field tuning in more narrow frequency range $\Delta f \sim 150$ MHz.

Conclusions. Adduced calculations indicate capability of the practical application of the microstrip band-pass filters with dual magnetic and electric field tuning as well as building a wide class of the frequency selective microwave device on the base of composite resonators, comprising DR and ferrite/piezoelectric planar structure. The electrical tuning will lead to low-loss, integrated circuit-compatible, high-speed microwave filters. Miniaturization of the device could be accomplished using permanent magnets to provide the required bias magnetic field.

Keywords: magnetoelectric effect, dielectric resonator, band-pass filter, dual tuning.