

Чвeртьхвильовий гeлiконовий резонатор

Вунтесмери В. С., Вунтесмери Ю. В.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

E-mail: vlsv@bigmir.net

У роботі досліджені характеристики не взаємного трансформатора на основі геліконового резонатора, на одну площину якого нанесений шар металізації. Показано, що такий резонатор є чвeртьхвильовим і дозволяє зменшити резонансну частоту майже вчетверо не збільшуючи габарити резонатора.

Ключові слова: не взаємний трансформатор; геліконовий резонатор; чвeртьхвильовий резонанс; добротність

Вступ

Для розв’язки сигналів в метровому та декаметровому діапазонах хвиль замість феритових можуть бути використані не взаємні пасивні пристрої (вентилі або циркулятори) на основі розмірного резонансу геліконових хвиль в замагніченій плазмі твердого тіла [1, 2]. Основним компонентом таких пристроїв є не взаємний трансформатор [3], який складається з пластинки напівпровідника з високою рухомістю носіїв заряду і двох взаємно перпендикулярно намотаних на пластинку котушок індуктивності. Зовнішнє сталє магнітне поле прикладене перпендикулярно до площини пластинки. Не взаємний зв’язок між котушками забезпечується збудженням в плазмі твердого тіла напівпровідника поляризованих по колу геліконових хвиль [4], які мають дуже малу фазову швидкість. Ефективна відносна діелектрична проникність напівпровідника для геліконових хвиль складає $10^8 \dots 10^9$. Для ефективного збудження геліконової хвилі товщина пластинки вибирається в межах половини геліконової хвилі [4, 5], що складає доли міліметра або декілька міліметрів в метровому та декаметровому діапазонах хвиль. Поперечні розміри пластинки повинні бути в 5...10 раз більшими за її товщину.

Основними характеристиками геліконових вентилів є смуга робочих частот та максимальна потужність розсіяння зворотної хвилі [6, 7]. В [8] проведені детальні дослідження максимальної потужності розсіяння зворотної хвилі геліконових вентилів, що побудовані на основі напівхвильового геліконового резонатора. Показано, що основним фактором, що обмежує максимальну потужність розсіяння зворотної хвилі є тепловий опір теплопровідної пасти, яка заповнює проміжок між напівхвильовим геліконовим резонатором і магнітною системою.

Метою цієї роботи є дослідження характеристик чвeртьхвильового геліконового резонатора [9], за-

стосування якого в геліконовому вентилі дозволить збільшити максимальну потужність розсіяння зворотної хвилі при збереженні габаритів геліконового вентиля.

1 Постановка задачі

Геліконові хвилі поширюються в напівпровідниках з великою рухомістю носіїв заряду вздовж напрямку прикладеного зовнішнього сталого магнітного поля B_0 . Умовою поширення є $u = \omega_c \tau = \mu_n B_0 > 1$ [4], де $\omega_c = \frac{|e|}{m} B_0$ - циклотронна частота електронів, τ - час релаксації, $\mu_n = \frac{|e| \tau}{m}$ - рухомість електронів, e - заряд електрону, m - ефективна маса електрону. При технічно реалізуємих магнітних полях цій умові відповідають антимонід індія та кадмій-ртуть-теллур [10, 11]. Замагнічений напівпровідник для геліконових хвиль може бути представлений як діелектрик з відносною ефективною діелектричною проникністю $\epsilon_{e\phi \pm}$ [6]

$$\epsilon_{e\phi \pm} = \epsilon_L - \frac{ne\mu_n}{\omega\epsilon_0\epsilon_L} \cdot \frac{(\omega \pm \omega_c)\tau}{1 + (\omega \pm \omega_c)^2\tau^2} - i \frac{ne\mu_n}{\omega\epsilon_0\epsilon_L} \cdot \frac{1}{1 + (\omega \pm \omega_c)^2\tau^2} \quad (1)$$

де ω - частота геліконової хвилі, n - концентрація електронів, ϵ_L - діелектрична проникність кришталеві гратки напівпровідника, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична стала в системі СІ.

Відносна ефективна діелектрична проникність може досягати дуже великих значень. Наприклад, для напівпровідника з $n = 10^{24}$ м⁻³ на частоті $f = 100$ МГц, при $B_0 = 1$ Тл $\epsilon_{e\phi+} = 1,4 \cdot 10^6$, фазова швидкість $v_{\phi+} = c/\sqrt{\epsilon_{e\phi+}} = 2,5 \cdot 10^5$ м/с і довжина геліконової хвилі $\lambda_{\phi+} = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_{e\phi+}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Хвильове число для право і ліво поляризованих геліконових хвиль знаходимо за формулами [7]

$$\begin{aligned} k_+ &= \beta_+ - j\alpha_+ = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2(1+u^2)}} \cdot \\ &\cdot \left(\sqrt{\sqrt{1+u^2}+u} - j\sqrt{\sqrt{1+u^2}-u} \right) \\ k_- &= \beta_- - j\alpha_- = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2(1+u^2)}} \cdot \\ &\cdot \left(\sqrt{\sqrt{1+u^2}-u} - j\sqrt{\sqrt{1+u^2}+u} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна стала в системі СІ, σ - провідність напівпровідника.

З використанням (2) та хвильового числа вільного простору та металу знайдемо резонансну частоту чвертьхвильового геліконового резонатора.

2 Розмірний резонанс геліконових хвиль у нескінченному плоскопаралельному шарі

Розглянемо випадок, коли геліконова хвиля поширюється уздовж зовнішнього постійного магнітного поля в пластині напівпровідника кінцевої товщини з нескінченними поперечними розмірами. Постійне магнітне поле B_0 перпендикулярно поверхні пластини (рис. 1). Права сторона пластини на відстані $+d$ металізована металом з провідністю σ_m .

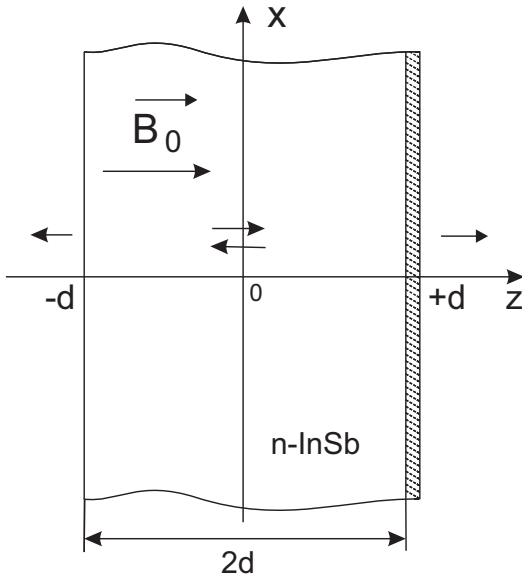


Рис. 1. Розмірний резонанс геліконової хвилі у нескінченному плоско-паралельному шарі

При поширенні геліконових хвиль нормально до межі розділу двох середовищ в плоскопаралельному

шарі виникають стоячі геліконові хвилі за рахунок багаторазового перевідбиття від межі розділу. У нескінченному плоскопаралельному шарі умова резонансу може бути записана у вигляді рівняння балансу фаз розмірного резонансу

$$\varphi_1 + \varphi_2 + 2\beta l = 2\pi n \quad (3)$$

де φ_1 - фаза коефіцієнту відбиття від першої межі розділу двох середовищ напівпровідник і повітря з координатою $-d$, φ_2 - фаза коефіцієнту відбиття від другої межі розділу двох середовищ напівпровідник і метал з координатою $+d$, β - коефіцієнт фази геліконової хвилі, $l = 2d$ товщина пластини, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ - натуральний ряд чисел.

Коефіцієнт відбиття для геліконової хвилі при нормальному падінні на межу розділу напівпровідник-повітря з боку напівпровідника знаходимо із розв'язку граничної задачі й може бути записаний у вигляді

$$\Gamma_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

де Z_1 і Z_2 - характеристичні опори напівпровідника й повітря відповідно. Оскільки $Z = 120\pi\sqrt{\mu/\varepsilon}$, то можна записати

$$\Gamma_1 = \frac{\sqrt{\mu_2/\varepsilon_2} - \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}}{\sqrt{\mu_2/\varepsilon_2} + \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}} \quad (5)$$

Для межі розділу напівпровідник-повітря, коли $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\varepsilon_2 = 1$ і $\varepsilon_1 = \varepsilon_+$, рівняння (4) має вид

$$\Gamma_1 = \frac{\sqrt{\varepsilon_+} - 1}{\sqrt{\varepsilon_+} + 1} \quad (6)$$

Помноживши чисельник і знаменник на $k_0 = \omega/c$ - хвильове число електромагнітної хвилі у вільному просторі й враховуючи, що хвильове число для правополяризованої геліконової хвилі $k_+ = \beta_+ - j\alpha_+ = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_+}$, одержимо коефіцієнт відбиття геліконової хвилі від лівої сторони пластини на відстані $-d$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{k_+ - k_0}{k_+ + k_0} = \sqrt{\frac{(\beta_+ - k_0)^2 + \alpha_+^2}{(\beta_+ + k_0)^2 + \alpha_+^2}} \cdot \\ &\cdot e^{j\left(\arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ + k_0} - \arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ - k_0}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

Із формули (7) знаходимо

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ + k_0} - \arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ - k_0} \quad (8)$$

Коефіцієнт відбиття геліконової хвилі від правої сторони пластини на відстані $+d$ знаходимо з (7), замінивши хвильове число у вільному просторі на

хвильове число у металі $k_m = \Delta^{-1}(1 - j)$, де $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma_m\mu_0\mu}}$ — товщина скін-шару в металі

$$\Gamma_2 = \frac{k_+ - k_m}{k_+ + k_m} = \sqrt{\frac{((\beta_+ - \Delta^{-1})^2 + (\alpha_+ - \Delta^{-1})^2)}{(\beta_+ + \Delta^{-1})^2 + (\alpha_+ + \Delta^{-1})^2}} \cdot e^{j\left(\arctan \frac{\alpha_+ + \Delta^{-1}}{\beta_+ + \Delta^{-1}} - \arctan \frac{\alpha_+ - \Delta^{-1}}{\beta_+ - \Delta^{-1}}\right)} \quad (9)$$

Із формули (9) знаходимо

$$\varphi_2 = \arctan \frac{\alpha_+ + \Delta^{-1}}{\beta_+ + \Delta^{-1}} - \arctan \frac{\alpha_+ - \Delta^{-1}}{\beta_+ - \Delta^{-1}} \quad (10)$$

Підставляючи значення аргументу коефіцієнта відбиття з (8) і (10) в (2) запишемо умову розмірного резонансу у вигляді

$$\left(\arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ + k_0} - \arctan \frac{\alpha_+}{\beta_+ - k_0}\right) + \left(\arctan \frac{\alpha_+ + \Delta^{-1}}{\beta_+ + \Delta^{-1}} - \arctan \frac{\alpha_+ - \Delta^{-1}}{\beta_+ - \Delta^{-1}}\right) + 2\beta_+(2d) = 2\pi n \quad (11)$$

Формула (11) є повною формою запису умови розмірного резонансу геліконових хвиль у нескінченному плоско-паралельному шарі напівпровідника з односторонньою металізацією. Оскільки для геліконових хвиль відносна ефективна діелектрична проникність плазми твердого тіла на багато порядків більша, ніж діелектрична проникність повітря, тобто $k_0 \ll \beta_+$, ($\varphi_1 = 0$), і для провідника $\Delta^{-1} \gg \beta_+$, α_+ , ($\varphi_2 = \pi/2 - \pi/2 + \pi$) то умову резонансу (11) з достатньою точністю можна описати рівнянням

$$\pi + 2\beta_+(2d) = 2\pi n \quad (12)$$

Цю формулу можна застосовувати для геліконових резонаторів у вигляді одностороннє металізованих напівпровідникових пластин кінцевих розмірів, якщо поперечні розміри пластини резонатора набагато більше його товщини. При невиконанні цієї умови необхідно враховувати поправки на “хвилеводний ефект”.

Підставивши в формулу (12) значення $\beta_+ = 2\pi/\lambda_+$, де λ_+ — довжина геліконової хвилі, знайдемо при $n = 1$ товщину пластини для першого розмірного резонансу $2d = \lambda_+/4$. Таким чином, одностороння металізація пластини замагніченого напівпровідника перетворює його на чвертьхвильовий геліконовий резонатор. Резонансні частоти геліконового резонансу пластини товщиною $2d$ знаходимо із (3) з врахуванням (2), (8), (10).

Для напівхвильового резонансу наближено

$$f_0 = \frac{\pi(1 + u^2)}{(2d)^2\mu_0\sigma(\sqrt{1 + u^2} + u)} \quad (13)$$

Для чвертьхвильового резонансу наближено

$$f_0 = \frac{\pi(1 + u^2)}{4(2d)^2\mu_0\sigma(\sqrt{1 + u^2} + u)} \quad (14)$$

На відміну від розмірного резонансу в діелектричному резонаторі напівхвильовий та чвертьхвильовий резонанси в геліконовому резонаторі відрізняються не в два, а в чотири рази, що пояснюється дисперсією геліконових хвиль в плазмі твердого тіла.

3 Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження чвертьхвильового геліконового резонатора проводились методом схрещених котушок з використанням панорамного вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі та відбиття Р4-11 за стандартною методикою. Схему вимірювального стенду показано на Рис. 2. Геліконовий резонатор в формі паралелепіпеда зі сторонами $11,5 * 11,5 * 2,2$ мм³ виконаний із антимоніда індія n -типу з параметрами при кімнатних температурах: концентрація електронів $1,8 \cdot 10^{22}$ м⁻³, рухомість 4 м²/(В · сек). Геліконовий резонатор з намотаними взаємно перпендикулярно котушками індуктивності розміщувався між полюсами нагніту з магнітною індукцією $0,65$ Тл. Виводи котушок індуктивності підключалися до приладу Р4-11.

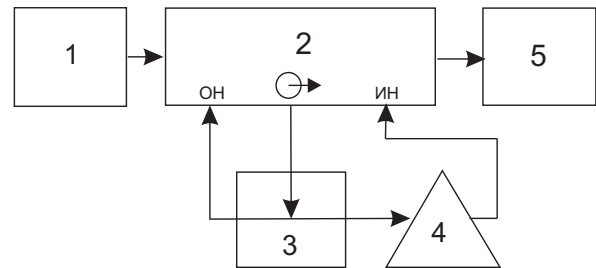


Рис. 2. Схема вимірювального стенду: 1 — блок генератора, 2 — перетворювач НВЧ, 3 — розгалужувач, 4 — невзаємний трансформатор, 5 — блок індикації.

На Рис. 3 (крива 1) наведено частотну характеристику коефіцієнта передачі трансформатора з геліконовим резонатором в якості осердя. Резонансна частота напівхвильового геліконового резонансу становить 68 МГц. Ширина резонансної кривої на рівні 3 дБ дорівнює 25 МГц. Розрахунок за формулою (13) встановлює резонансну частоту $69,3$ МГц.

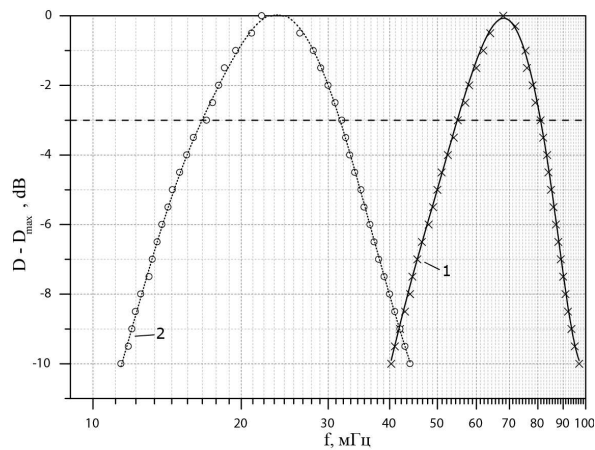


Рис. 3. Резонансні характеристики невід взаємного трансформатора: 1 – без металізації, 2 – з металізацією припоєм

На Рис. 3 (крива 2) показано частотну характеристику коефіцієнта передачі трансформатора з тим самим геліконовим резонатором, але металізованим з однієї сторони припоєм з провідністю 10^7 сим/м. Як видно із рисунка, резонансна частота геліконового резонатора зменшилась майже в чотири рази. Зменшення добротності чвертьхвильового геліконового резонатора можна пояснити додатковими втратами в шарі металізації.

Висновки

Одностороння металізація напівхвильового геліконового резонатора перетворює його на чвертьхвильовий резонатор, резонансна частота якого майже в 4 рази менша від напівхвильового резонанса при однакових геометричних розмірах резонаторів. Такий великий зсув резонансної частоти пояснюється значною дисперсією геліконових хвиль в плазмі твердого тіла. Застосування чвертьхвильового геліконового резонатора для геліконових вентилів дозволить зменшити габарити або збільшити розсіяну потужність вентилів при переході від метрового до декаметрового діапазонів хвиль. Збільшення робочої потужності вентиля на чвертьхвильовому резонаторі обумовлено кращим відводом тепла від резонатора через металізовану поверхню. Кількісні характеристики геліконового вентиля на основі чвертьхвильового геліконового резонатора щодо розсіяної потужності прямого та зворотного загасання та інші можуть бути отримані після виготовлення та дослідження його робочого макету.

Перелік посилань

1. Вунтесмери В.С. Полупроводниковые вентиля для радиопередатчиков КВ и УКВ диапазонов / В.С. Вунтесмери, Ю.В. Завражнов, Г.П. Красилыч, Е.Е. Мещеряков // Теория и техника радиосвязи. – Воронежский НИИ связи. – 1993. – Вып. 1. – с. 132-139.

2. Толутис Р.Б. О свойствах полупроводниковых ВЧ-вентилей на эффекте размерного резонанса электромагнитных магнитолазменных волн / Р.Б. Толутис // Радиотехника и Электроника. – 1978. – Т. 23, № 3. – с. 608-613.
3. Laurinavičius L. Helicon Resonator based Strong Magnetic Field Sensor / L. Laurinavičius // Measurement science review. – 2011. – Vol. 11, No. 5. – p. 149-153
4. Вунтесмери Ю.В. Индуктивные характеристики не взаимных трансформаторов на основе гиротропных сред / Ю.В. Вунтесмери // Электроника и связь. – 2000. – Т. 2, № 8. – с. 223-225.
5. Gremillet J. Propagation des ondes metriques et decametriques dans les semi-conducteurs et presence d'une induction magnetique continue. Effect "Helicon" / J. Gremillet // Annales de Radioelectricite. – 1964. – № 76. – p. 122.
6. Лауринавичус Л.В. О повышении рабочей мощности коротковолновых геликоновых вентилей / Л.В. Лауринавичус, Р.Б. Толутис // Литовский физический сборник. – 1983. – Т. 23, №1. – С. 50-55.
7. Vountesmary V.S. Temperature Characteristics of Broadband Helicon Isolators for Meter and Decameter Waves / V.S. Vountesmary, Yu. V. Vountesmary // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – Vol. 55, Iss. 10. – pp. 2097-2102.
8. Вунтесмери Ю.В. Модель теплопереноса в геликоновом вентиле / Ю.В. Вунтесмери // Электроника и Связь. – 2011. – № 3. – С. 24-27.
9. Мовчан М.М. Невзаимное возбуждение четвертьволнового геликонового резонанса в композитном феррит-полупроводниковом резонаторе / М.М. Мовчан, И.В. Зависляк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2011. – С. 676-677.
10. Madelung O. Semiconductors: Data Handbook / O. Madelung. – Springer Berlin Heidelberg, 2004. – 514 p.
11. Berger L. Semiconductor Materials / L. Berger. – CRC Press Reference, 1996. – 496 p.

References

- [1] Vuntsemeri V.S., Zavrazhnov Yu.V., Krasilich G.P. and Meshcheryakov E.E. (1993) Poluprovodnikovye ventili dlya radiopredatchikov KV i UKV diapazonov [Semiconductor valves for transmitters HF and VHF bands]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*. Voronezhskii NII svyazi, Iss. 1, pp. 132-139
- [2] Tolutis R.B. (1978) O svoistvakh poluprovodnikovykh VCh-ventilei na effekte razmernogo rezonansa elektromagnitnykh magnitoplazmennyykh voln [On the properties of RF semiconductor gates on the effect of the resonance size of magnetoplasma electromagnetic waves]. *Radiotekhnika i Elektronika*. Vol. 23, No 3, pp. 608-613.
- [3] Laurinavičius L. (2011) Helicon Resonator based Strong Magnetic Field Sensor. *Measurement science review*, Vol. 11, No. 5, pp. 149-153. DOI: 10.2478/v10048-011-0029-7
- [4] Vuntsemeri Yu. V. (2000) Induktivnye kharakteristiki nevzaimnykh transformatorov na osnove girotropnykh sred [Inductive non-reciprocal characteristics of transformers on the basis of Gyrotropic media]. *Elektronika i svyaz'*, Vol. 2, No 8, pp. 223-225.

- [5] Gremillet J. (1964) Propagation des ondes metriques et decametriques dans les semi-conducteurs et presence d'une induction magnetique continue. Effect Helicon: *Annales de Radioelectricite*. No 76, p. 122.
- [6] Laurinavichus L.V. and Tolutis R.B. (1983) О повышении рабоchei moshchnosti korotkovolnovykh gelikonnykh ventilei [On increasing the operating power of shortwave helicon valves]. *Litovskii fizicheskii sbornik*, Vol. 23, No 1, pp. 50-55.
- [7] Vountesmery V.S. and Vountesmery Yu.V. (2007) Temperature Characteristics of Broadband Helicon Isolators for Meter and Decameter Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, Iss. 10., pp. 2097-2102. DOI: 10.1109/TMTT.2007.905489
- [8] Vuntesmery Yu.V. (2011) Model' teploperenosa v gelikonovom ventile [Heat transfer model in helicon valve]. *Elektronika i Svyaz'*, No 3, pp. 24-27.
- [9] Zavislyak I.V. and Movchan N.N. (2011) Nonreciprocal excitation of $\lambda/4$ helicon resonance in ferrite-semiconductor composite resonator. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2011 21th International Crimean Conference*, pp. 676-677.
- [10] Madelung O. (2004) *Semiconductors: Data Handbook*, Springer Berlin Heidelberg, 514 p.
- [11] Berger L. (1996) *Semiconductor Materials*, CRC Press Reference, 496 p.

Четвертьволновой геликоновый резонатор

Вунтесмери В. С., Вунтесмери Ю. В.

В работе исследованы характеристики невзаимного трансформатора на основе геликонового резонатора, на

одну плоскость которого нанесен слой металлизации. Показано, что такой резонатор является четвертьволновым, что позволяет уменьшить резонансную частоту почти в четыре раза не увеличивая габариты резонатора.

Ключевые слова: невзаимный трансформатор; геликоновый резонатор; четвертьволновой резонанс; добротность

Quarter-wave helicon resonator

Vountesmery, V. S., Vountesmery, Yu. V.

Introduction. Helicon waves propagates in the magnetized semiconductor plasma. Helicon waves with circular polarization has a nonreciprocal propagation effect and may have a half-wave resonance between faces of parallel plate of semiconductor. Such resonator being coupled with two orthogonal inductor coils becomes a nonreciprocal transformer. This article presents the results of an experimental research of the nonreciprocal transformer based on a modified helicon resonator. Main part. One of the resonator plates is coated with a layer of metal. It is shown, that such resonator becomes quarter-wave. The theoretical basis of the resonance shift is proposed. Experimental results are also presented and discussed. Conclusion. It is shown, that one-side metallization makes possible to reduce the resonant frequency of almost four times, at the same dimensions of the helicon resonator. Furthermore plating improves the heat transfer from the plate of resonator and hence the maximum dissipated power at the same dimensions.

Key words: nonreciprocal transformer; helicon resonator; quarter-wave resonance; Q-factor