

Мікросистеми та фізична електроніка

УДК 621.372.41

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.4.126393](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.4.126393)

Управляемые частотно-селективные структуры СВЧ на основе неоднородной микрополосковой линии передачи

Мазур К. С., ORCID [0000-0001-5462-0342](https://orcid.org/0000-0001-5462-0342)e-mail kostia.mazur@gmail.comСергеева А. А., ORCID [0000-0002-8280-8139](https://orcid.org/0000-0002-8280-8139)e-mail alina.pysarenko@ukr.netТатарчук Д. Д., к.т.н., доцент, ORCID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)e-mail d.tatarchuk@kpi.uaДиденко Ю. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)e-mail yu.didenko@kpi.ua

Кафедра микрорелектроніки

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Рассмотрены частотно-селективные структуры на основе отрезков микрополосковой линии со ступенчатой неоднородностью. Проанализированы методы управления электродинамическими характеристиками полученных структур со ступенчатой неоднородностью. Проведен расчет структур фильтра и фазовращателя на основе отрезков микрополосковой линии со ступенчатой неоднородностью. Предложены конструкции частотно-селективных устройств на основе этих структур. Приведены результаты измерений основных характеристик частотно-селективных структур на основе отрезков микрополосковой линии со ступенчатой неоднородностью.

Библ. 13, рис. 6.

Ключевые слова — микрополосковая линия со ступенчатой неоднородностью; фильтр СВЧ; фазовращатель; оптическое управление; электродинамические характеристики.

1. ВВЕДЕНИЕ

В технике СВЧ широко применяют резонансные устройства на основе микрополосковых линий. Такие устройства обладают рядом полезных свойств: они совместимы с планарной технологией и могут быть изготовлены в едином технологическом цикле с активными приборами.

Исторически первыми были созданы частотно-селективные структуры на основе однородных микрополосковых линий передачи. Однако они имеют определенные недостатки. Фильтр, состоящий из отрезка с включенными на его концах активными сопротивлениями разной величины, имеет узкую полосу пропускания и обладает многополосностью. Однородные линии применяются лишь для согласования комплексных сопротивлений в узкой полосе частот. Однородные отрезки имеют кратные резонансные частоты. Все эти факторы существенно сужают область применения однородных линий [1].

В связи с этим в последнее время для создания микрополосковых частотно-селективных структур все чаще используют неоднородные линии передачи. Их свойства зависят от закона изменения волнового сопротивления вдоль линии, что дает дополнительные возможности для формирования требуемых АЧХ и ФЧХ [1]. Поэтому целью данной работы является исследование возможности создания на основе ступенчатой неоднородной микрополосковой линии передачи частотно-селективных устройств, таких, как фильтры и фазовращатели.

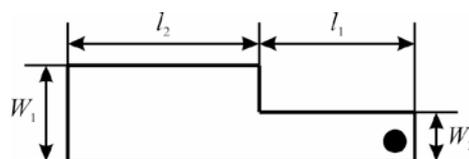


Рис. 1. Микрополосковый резонатор со ступенчатой неоднородностью.



II. ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Рассмотрим четвертьволновой резонатор со ступенчатой неоднородностью, который состоит из двух отрезков микрополосковой линии, соединенных последовательно (рис. 1). Отрезки имеют различные волновые сопротивления. Таким образом, на границе между двумя отрезками волновое сопротивление линии изменяется скачкообразно. Отрезок с большим волновым сопротивлением соединен с подложкой (место соединения обозначено на рис. 1 черным кругом).

В этом случае входное сопротивление резонатора можно представить соотношением:

$$Z_{in0} = Z_{w2} \frac{j(Z_{w1}tg(\beta\ell_1) + Z_{w2}tg(\beta\ell_2))}{Z_{w2} - Z_{w1}tg(\beta\ell_1)tg(\beta\ell_2)} \quad (1)$$

Используя граничные условия на торцах резонатора, определяются волновые числа и резонансная частота данной резонансной системы. Погрешность расчета не превышает 2...4 % в широком диапазоне соотношений размеров l_2/l_1 и W_2/W_1 [2].

Наши исследования показали перспективность использования таких резонаторов для создания простых двухзвенных фильтров (рис. 2), а также фильтров с перестраиваемыми характеристиками [3]. АЧХ таких фильтров зависит как от характеристик резонаторов, так и от коэффициента емкостной связи между ними.

Рассчитать коэффициент емкостной связи можно, используя методику, предложенную в [4]. Такой подход очень гибок, поскольку позволяет формировать требуемую характеристику фильтра, а также получить теоретическое обоснование зависимости характеристик фильтров от коэффициентов связи между резонаторами.

Коэффициент емкостной связи может быть определен по сдвигу резонансной частоты связанного и несвязанного резонаторов:

$$k = \pm \frac{1}{2} \left(\frac{f_{02} + f_{01}}{f_{02} - f_{01}} \right) \sqrt{\left(\frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \right)^2 - \left(\frac{f_{02}^2 - f_{01}^2}{f_{02}^2 + f_{01}^2} \right)^2} \quad (2),$$

где f_{01} и f_{02} – собственные резонансные частоты резонаторов; f_{p1} и f_{p2} – резонансные частоты связанных резонаторов.

Если резонансные частоты резонаторов совпадают, то данное выражение упрощается:



Рис. 2. Конструкция двухрезонаторного фильтра.

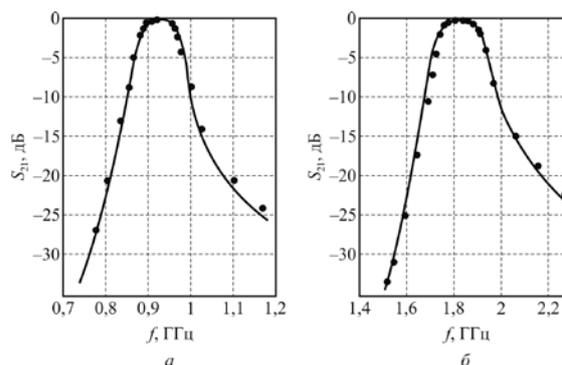


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные АЧХ двухрезонаторных фильтров на основе микрополосковых линий со ступенчатой неоднородностью на диапазоны 900 МГц (а) и 1800 МГц (б), изготовленных на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,6$ и 38 соответственно [5].

$$k = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (3)$$

На основании этой методики расчета нами были спроектированы и экспериментально исследованы двухрезонаторные фильтры, АЧХ которых приведены на рис. 3.

III. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Существует ряд способов управления характеристиками частотоселективных структур [6]–[10]:

- управление диэлектрической проницаемостью с помощью электрического поля (например, с использованием сегнетоэлектрических пленок);
- управление эффективной проницаемостью системы за счет изменения её геометрии (например, изменение взаимного расположения частей структуры с помощью электромеханических преобразователей);
- оптическое управление диэлектрической проницаемостью;
- управление магнитной проницаемостью с помощью магнитного поля;
- комбинированное магнито-электрическое управление;
- управление проводимостью материала с помощью электрического поля, освещения и т. д.

Каждый из перечисленных методов обладает своими достоинствами и недостатками. Например, для управления диэлектрической проницаемостью с помощью электрического поля необходимы сильные поля, также этот метод вносит большие потери. Управление емкостью позволяет управлять резонансной частотой в широких пределах, но при этом также значительно уменьшается добротность. Системы

с магнитным управлением имеют большие массогабаритные показатели, и т. д..

Для управления резонансными частотами фильтров нами были выбраны два способа: управление эффективной проницаемостью системы за счет изменения её геометрии и управление проводимостью материала с помощью электрического поля и освещения.

Для реализации управления эффективной проницаемостью системы за счет изменения её геометрии была разработана конструкция двухрезонаторного фильтра, аналогичная представленной на рис. 2. Сечение такого фильтра показано на рис. 4, а.

Управление реализовано путем изменения ширины зазора между подложкой и земляным электродом. Введенная таким образом воздушная неоднородность (зазор) искажает силовые линии электрического поля системы, что приводит к его возмущению. Как следствие, имеет место смещение резонансной частоты системы даже при малых изменениях ширины воздушного зазора. На рис. 4, б показана АЧХ данного фильтра. Перемещение металлической мембраны осуществлялось при помощи пьезоэлектрического актюатора.

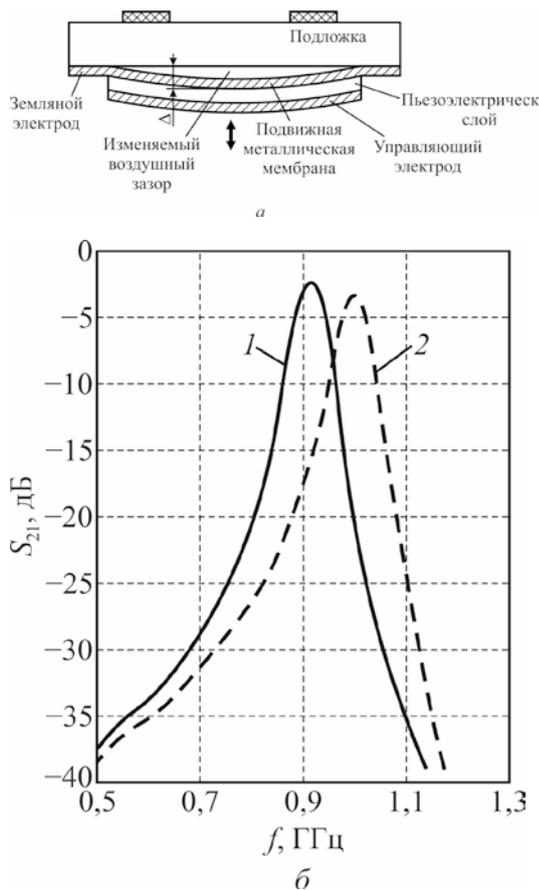


Рис. 4. Конструкция (а) и АЧХ (б) фильтра на основе неоднородной микрополосковой линии передачи с электромеханическим управлением: 1 – АЧХ при $\Delta = 10$ мкм; 2 – АЧХ при $\Delta = 100$ мкм.



Рис. 5. Схематическое изображение конструкции рабочего макета фильтра на основе неоднородных микрополосковых линий на подложке из высокоомного GaAs.

В исследуемом фильтре при изменении величины воздушного зазора от 10 до 100 мкм смещение резонансной частоты составило $\sim 10\%$. При этом максимальное значение управляющего напряжения составляло ~ 300 В.

Преимуществом данного способа управления является возможность плавного изменения резонансной частоты фильтра. Однако есть и существенные недостатки – сравнительно низкое быстродействие и высокое управляющее напряжение.

На сегодняшний день значительный интерес вызывает оптическое управление [11], [12]. Это вызвано тем, что такие системы имеют повышенное быстродействие, устойчивы к СВЧ-помехам, легко интегрируются с волоконно-оптическими сетями и устройствами обработки информации.

В наших исследованиях оптическое управление было реализовано за счет изменения эффективной диэлектрической проницаемости при освещении полупроводниковой GaAs-подложки. При нормальных условиях и при отсутствии освещения в СВЧ-диапазоне собственные полупроводники (Si и GaAs) имеют низкий уровень потерь [13].

Структура исследуемого макета полоско-заграждающего фильтра изображена на рис. 5. На GaAs-подложке размером $20 \times 10 \times 0,4$ мм был сформирован микрополосковый резонатор, подключенный к микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Исследования проводились в частотном диапазоне 3...6 ГГц. Добротность резонансного отрезка на резонансной частоте 3,43 ГГц составила $Q_0 = 240$.

При освещении GaAs-подложки GaAs 840 нм светодиодом с акриловой линзой яркостью 2000 кд/м² коэффициент передачи в полосе заграждения менялся от -27 дБ (без освещения) до -21 дБ. При этом наблюдалось смещение резонансной частоты на 1% в область более низких частот.

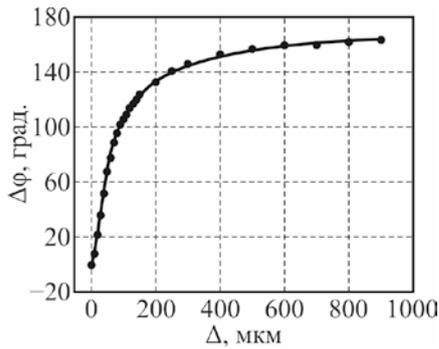


Рис. 6. Фазовая характеристика исследуемого фильтра.

IV. УПРАВЛЯЕМЫЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

На основе структуры, представленной на рис. 4, а, можно реализовать не только фильтры, но и другие резонансные устройства, в том числе фазовращатели.

Как известно, частотная зависимость фазы вблизи резонанса описывается выражением:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{1}{Q} \frac{\omega / \omega_0}{1 - (\omega / \omega_0)^2} \right) \quad (4)$$

где Q – добротность резонансной системы; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; ω_0 – резонансная частота, выраженная через длину отрезка микрополосковой линии l ($\omega_0 = \pi c / (l^2 \epsilon_{eff})^{1/2}$); c – скорость света в вакууме; ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки.

Очевидно, что значение управляемого сдвига фазы будет зависеть от производной фазы по эффективной проницаемости:

$$\frac{d\varphi}{d\epsilon_{eff}} = \frac{Q\omega}{2\omega_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{Q^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \sqrt{\epsilon_{eff}} + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

Около резонанса $\omega \approx \omega_0$, потому справедливо выражение:

$$\frac{d\varphi}{d\epsilon_{eff}} \approx \frac{Q}{\epsilon_{eff}} \quad (6)$$

В случае согласованного отрезка микрополосковой линии такой же длины l сдвиг фазы сигнала равен:

$$\varphi = \frac{2\pi l \sqrt{\epsilon_{eff}}}{\lambda} \quad (7),$$

где λ – длина волны сигнала в вакууме.

В результате:

$$\frac{d\varphi}{d\epsilon_{eff}} \approx \frac{\pi l}{\lambda \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (8)$$

Был исследован сдвиг фаз управляемого фильтра на основе отрезков микрополосковой линии со ступенчатой неоднородностью (рис. 4, а). Результаты исследования представлены на рис. 6.

Выводы

В работе исследованы резонансные структуры на основе отрезков микрополосковых линий. Предложены конструкции управляемых фильтров с электро-механическим и оптическим управлением. Экспериментальное исследование предложенных конструкций показало, что в случае электромеханического управления изменение частоты составляет 10 % при изменении воздушного зазора между подложкой и земляным электродом от 10 до 100 мкм. При этом добротность системы почти не изменяется. Для оптического способа управления получена перестройка резонансной частоты 1 % при добротности 240, что является достаточным для практического использования для компенсации температурных флуктуаций параметров фильтра, который, в свою очередь, может применяться в средствах связи.

Полученные результаты подтверждают перспективность рассматриваемых структур для создания на их основе управляемых частотоселективных устройств СВЧ.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- [1] O. N. Litvinenko and V. I. Soshnikov, *Kolebatelnyye sistemy iz otrezkov neodnorodnykh linii* [Vibrational systems from segments of inhomogeneous lines]. Moscow: Soviet radio, 1972.
- [2] V. I. Molchanov, V. M. Pashkov, and D. D. Tatarchuk, "Rezonnatory na osnovi korotkozamknykh vidrizkiv neodnorodnykh linii iz stupinchastoiu neodnorodnistiu [Resonators based on short-closed segments of inhomogeneous lines with stepwise heterogeneity]," *Electron. Commun.*, vol. 16, pp. 47–48, 2002.
- [3] Y. Poplavko, D. Schmigin, V. Pashkov, M. Jeong, and S. Baik, "Tunable microstrip filter with piezo-moved ground electrode," in *2005 European Microwave Conference*, 2005, p. 3 pp.-pp.1294, DOI: [10.1109/EUMC.2005.1610171](https://doi.org/10.1109/EUMC.2005.1610171).
- [4] B. A. Belyaev, M. M. Titov, and V. V. Tyurnev, "Coupling coefficient of irregular microstrip resonators," *Radiophys. quantum Electron.*, vol. 43, no. 8, pp. 649–653, 2000, URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=5029527>.
- [5] D. Shmygin, D. Tatrchuk, A. Yerenenko, V. Pashov, V. Molchanov, and Y. Poplavko, "Microwave tunable filters with impedance step," in *2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*, 2010, pp. 653–654, DOI: [10.1109/CRMICO.2010.5632673](https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632673).
- [6] P. Yaghmaee, O. H. Karabey, B. Bates, C. Fumeaux, and R. Jakoby, "Electrically Tuned Microwave Devices Using Liquid Crystal Technology," *Int. J. Antennas Propag.*, pp. 1–9, 2013, DOI: [10.1155/2013/824214](https://doi.org/10.1155/2013/824214).
- [7] A. S. Nagra, O. Jerphagnon, P. Chavarkar, M. VanBlaricum, and R. A. York, "Bias free optical control of microwave circuits and antennas using improved optically variable capacitors," in *2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017)*, 2000, vol. 2, pp. 687–690, DOI: [10.1109/MWSYM.2000.863276](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2000.863276).
- [8] P. R. Herzfeld, A. S. Daryoush, V. M. Contarino, A. Rosen, Z. Turksi, and A. P. S. Khana, "Optically Controlled Microwave Devices and Circuits," in *MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1985, pp. 211–214, DOI: [10.1109/MWSYM.1985.1131943](https://doi.org/10.1109/MWSYM.1985.1131943).



- [9] Z. Vagra, G. Jaro, and T. Berceli, "Optical control of microwave filters using photodiodes," in *10th MICROCOLL Conference*, 1999, pp. 299–302.
- [10] D. A. Shmigin, "Kerovani planarni filtry NVCh iz rukhomym elektrodom [Managed planar microwave filters with movable electrode]," in *Computer Science and Information Technology*, 2012, pp. 123–127,
URL:
http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/14867/1/17_Shmyhin_106_109_732.pdf.
- [11] A. J. Seeds and A. A. A. De Salles, "Optical control of microwave semiconductor devices," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 577–585, May 1990, **DOI:** [10.1109/22.54926](https://doi.org/10.1109/22.54926).
- [12] A. J. Seeds, "Microwave photonics," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 877–887, Mar. 2002, **DOI:** [10.1109/22.989971](https://doi.org/10.1109/22.989971).
- [13] Y. V. Didenko, "Chastotnyie i temperaturnyie zavisimosti dielektrichieskikh potier v poluprovodnikakh na SVCh [Frequency and temperature dependences of the dielectric loss in semiconductors at UHF]," *Electron. Commun.*, vol. 20, no. 3(86), pp. 9–11, 2015, **URL:** <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17553>.

Надійшла до редакції 19 березня 2018 р.

УДК 621.372.41

Керовані частотноселективні структури НВЧ на основі неоднорідної мікросмужкової лінії передачі

Мазур К. С., ORCID [0000-0001-5462-0342](https://orcid.org/0000-0001-5462-0342)

e-mail kostia.mazur@gmail.com

Сергєєва А. О., ORCID [0000-0002-8280-8139](https://orcid.org/0000-0002-8280-8139)

e-mail alina.pysarenko@ukr.net

Татарчук Д. Д., к.т.н., доцент, ORCID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

e-mail d.tatarчук@kpi.ua

Діденко Ю. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

e-mail yu.didenko@kpi.ua

Кафедра мікроелектроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Розглянуто частотноселективні структури на основі відрізків мікросмужкової лінії зі ступінчастою неоднорідністю. Проаналізовано методи управління електродинамічними характеристиками отриманих структур із ступінчастою неоднорідністю. Проведено розрахунок структур фільтра і фазообертача на основі відрізків мікросмужкової лінії із ступінчастою неоднорідністю. Запропоновано конструкції частотноселективних пристроїв на основі цих структур. Наведено результати вимірювань основних характеристик частотноселективних структур на основі відрізків мікросмужкової лінії із ступінчастою неоднорідністю.

Бібл. 13, рис. 6.

Ключові слова – мікросмужкова лінія зі ступінчастою неоднорідністю; фільтр НВЧ; фазообертач; оптичне керування; електродинамічні характеристики



UDC 621.372.41

Adjustable Frequency-Selective Microwave Structures Based on Heterogeneous Microstrip Transmission Line

K. S. Mazur, ORCID [0000-0001-5462-0342](https://orcid.org/0000-0001-5462-0342)

e-mail kostia.mazur@gmail.com

A. O. Serheieva, ORCID [0000-0002-8280-8139](https://orcid.org/0000-0002-8280-8139)

e-mail alina.pysarenko@ukr.net

D. D. Tatarchuk, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

e-mail d.tatarchuk@kpi.ua

Yu. V. Didenko, PhD, ORCID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

e-mail yu.didenko@kpi.ua

Microelectronics Department

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In this research, the possibility of creating frequency-selective structures in excess of the high-frequency range on the basis of inhomogeneous segments of microstrip lines was investigated. The calculation of a quarter-wave short-circuited resonator on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity is presented, on the basis of which a two-resonator microwave filter on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity was calculated. Using the calculations, bandpass filters on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity with central frequencies of 900 MHz and 1800 MHz were designed and experimentally tested for use in conjunction with GSM modules. Various methods of filter on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity control were considered: capacitance control by means of an electric field (for example, using varactors); control of dielectric permittivity by means of an electric field (for example, using ferroelectric films); control the effective permeability of the system by changing its geometry (for example, changing the mutual arrangement of parts of the structure using electromechanical transducers); optical control of dielectric permittivity; control of magnetic permeability with the help of a magnetic field; combined magneto-electric control; controlling the conductivity of the material by means of an electric field, lighting, etc. To control the resonant frequencies of the filters on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity, we chose two methods: controlling the effective permeability of the system by changing its geometry and controlling the conductivity of the material by means of an electric field and illumination. In first case, the control is realized by changing the width of the gap between the substrate and the earth electrode. The air discontinuity (gap) introduced in this way interrupts the lines of force of the electric field of the system, which leads to a strong perturbation. As a consequence, there is a significant shift in the resonant frequency of the system, even with small changes in the width of the air gap. In the second case, optical control was realized by changing the mobility of charge carriers under illumination of a semiconductor GaAs substrate. Experimental samples with these types of controls were created and investigated. The results of measurements are also presented in this paper. An experimental study of the proposed designs showed that in the case of electromechanical control, the frequency change is 10% when the air gap between the substrate and the earth electrode varies from 10 to 100 μm . At the same time, the quality factor of the system remains almost unchanged. For the optical control method, a resonance frequency tuning of 1% was obtained at a Q-factor of 240, which is sufficient for practical use. The shift of the phases of the controlled filter on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity was investigated. The phase shifter on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity was calculated and constructed on the previously designed filters. All the results of the phase shifter on the basis of microstrip line segments with a stepwise inhomogeneity studies are also presented in this paper.

Ref. 13, Fig. 6.

Keywords — *microstrip line with stepwise heterogeneity; microwave filter; phase shifter; optical control; electrodynamic characteristics*

