

11.1

## Микрополосковые фильтры с широкими полосами пропускания

© Б.А. Беляев<sup>1,2</sup>, С.А. Ходенков<sup>1</sup>, И.В. Говорун<sup>1,3</sup>, А.М. Сержантов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2020 г.

В окончательной редакции 15 декабря 2020 г.

Принято к публикации 24 декабря 2020 г.

Разработаны новые микрополосковые конструкции полосно-пропускающих фильтров на основе фильтра нижних частот, в котором часть или все отрезки высокоомных микрополосковых линий соединены с экраном шлейфами. Фильтры обладают высокими частотно-селективными свойствами, а их относительная ширина полосы пропускания попадает в интервал 30–150%. Экспериментальный образец фильтра с центральной частотой полосы пропускания 2 GHz и ее относительной шириной 70%, изготовленный на подложке из поликора толщиной 1 mm, имеет площадь подложки  $46 \times 21$  mm. Показано хорошее согласие измеренных амплитудно-частотных характеристик фильтра с характеристиками, рассчитанными с помощью численного электродинамического анализа его 3D-модели.

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий фильтр, микрополосковый резонатор, диэлектрическая подложка, амплитудно-частотная характеристика.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50796.18581

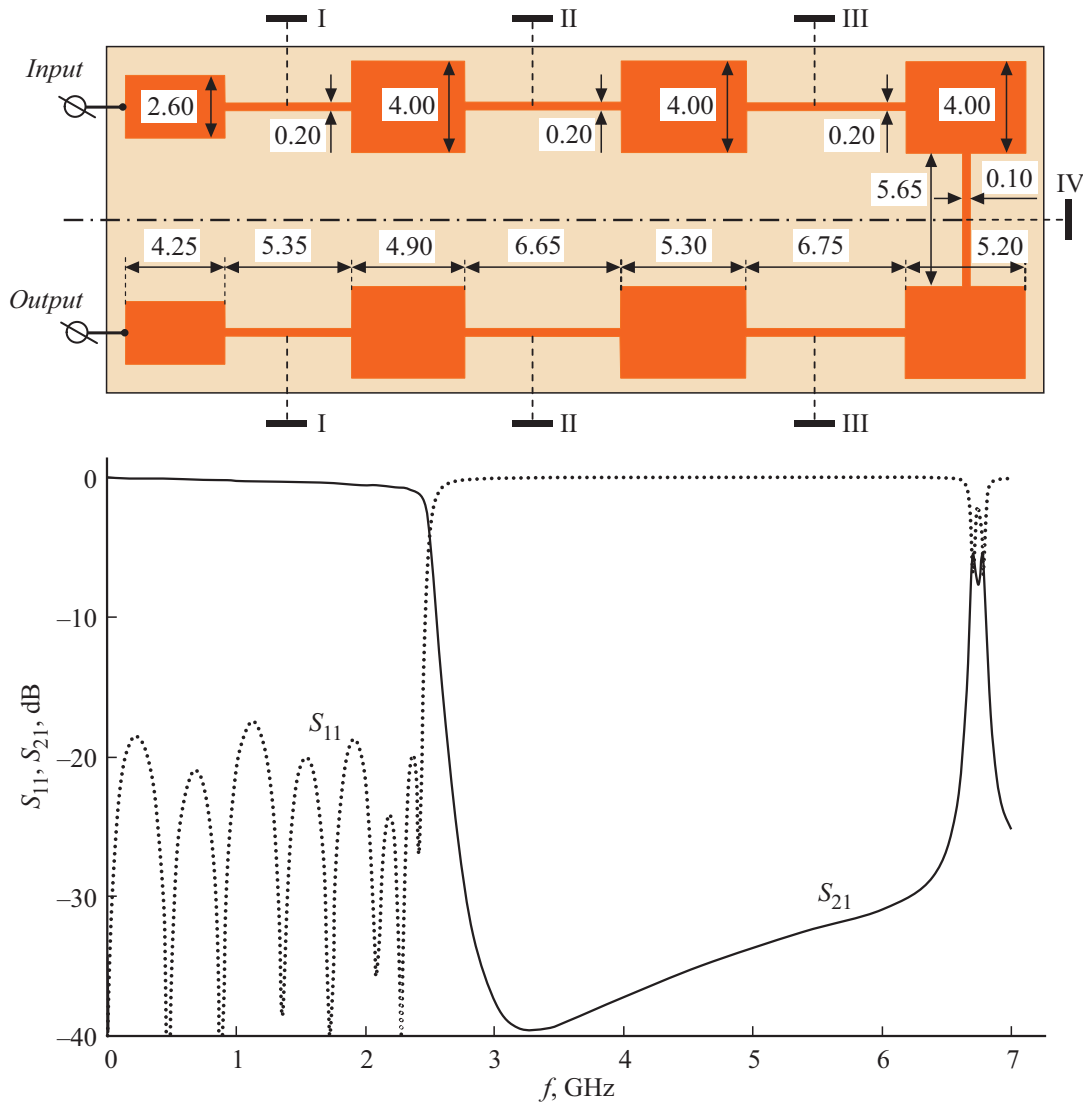
Увеличение скорости передачи информации является одной из важнейших задач в цифровых системах радиосвязи, при решении которой нередко прибегают к расширению рабочей полосы частот. Для таких систем требуются сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры, обладающие высокой избирательностью, конструкции которых активно разрабатываются в последние годы. Такие фильтры, как известно, легко реализуются каскадным соединением фильтра нижних частот (ФНЧ) с фильтром верхних частот [1,2]. Однако большой интерес представляют более простые и технологичные в изготовлении микрополосковые конструкции фильтров на связанных резонаторах, в которых частично удалена металлизация в экране для увеличения взаимодействия между резонаторами [3,4] или использованы трехмодовые резонаторы [5]. При этом для фильтров с относительной шириной полосы пропускания  $\Delta f/f_0$  больше 100% лучше подходят микрополосковые конструкции на нерегулярных четвертьволновых резонаторах, связанных либо кондуктивно [6,7], либо индуктивно [8].

Нами исследована новая конструкция сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра на основе микрополоскового ФНЧ седьмого порядка, топология проводников и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) которого представлены на рис. 1. Волновое сопротивление портов на входе и выходе фильтра равно 50  $\Omega$ . Подложка этого ФНЧ толщиной 1 mm из поликора с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9.8$  при частоте среза фильтра 2.5 GHz имеет сравнительно небольшую площадь ( $40 \times 16$  mm) благодаря свернутому вдвое нерегулярному проводнику. На представленном рисунке обозначены размеры регу-

лярных отрезков полоскового проводника конструкции в миллиметрах. Сворачивание проводника ФНЧ не только уменьшает длину подложки, но и увеличивает крутизну склона АЧХ [9] из-за появления дополнительной электромагнитной связи между несоседними резонаторами [10].

ФНЧ становится полосно-пропускающим фильтром, если с помощью шлейфов соединить с экраном часть или все узкие отрезки его нерегулярного проводника. В этом случае каждый шлейф не только играет роль параллельной индуктивности, как в фильтрах верхних частот, но и является взаимной индуктивностью соседних резонаторов, величина которой определяет их взаимодействие. На рис. 2 представлены АЧХ четырех фильтров, в первом из которых замкнуты на экран только два отрезка, обозначенные римской цифрой I на топологии проводников ФНЧ (рис. 1). Во втором фильтре замкнуты четыре отрезка, обозначенные цифрами I и II, в третьем — шесть (I, II и III), а в четвертом замкнуты все семь узких отрезков. Настройка фильтров осуществлялась подбором ширины проводников у шлейфов и небольшим смещением точки их подключения относительно середины узких проводников так, чтобы максимумы потерь на отражение в полосе пропускания фильтров были близки к  $-20$  dB. Чтобы не загромождать рисунок, на нем показана частотная зависимость потерь на отражение только для четвертого фильтра.

Для всех четырех конструкций фильтров в табл. 1 приведены значения центральной частоты полосы пропускания  $f_0$ , ее относительной ширины  $\Delta f/f_0$ , измеренной по уровню  $-3$  dB от уровня минимальных потерь, которые не превышали 0.4 dB, а также коэффициентов крутизны



**Рис. 1.** Топология полоскового проводника фильтра нижних частот (размеры регулярных отрезков полоскового проводника конструкции представлены в мм) и частотные зависимости его прямых потерь (сплошная линия) и потерь на отражение (пунктир).

низкочастотного  $k_l$  и высокочастотного  $k_h$  склонов АЧХ, вычисленных по формулам [11]:

$$k_l = \frac{\Delta f/2}{\Delta f_{30}^l - \Delta f/2}, \quad k_h = \frac{\Delta f/2}{\Delta f_{30}^h - \Delta f/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta f_{30}^l$  и  $\Delta f_{30}^h$  — полосы частот, измеренные от центральной частоты до низкочастотного или высокочастотного склона АЧХ по уровню  $-30$  dB.

Из таблицы видно, что центральная частота полосы пропускания для первой конструкции фильтра  $f_0 = 1.4$  GHz и равномерно увеличивается на 100 MHz для каждой последующей конструкции. При этом также равномерно уменьшается относительная ширина полосы пропускания  $\Delta f/f_0$  (от 150% для первой конструкции до 90% для четвертой). Из таблицы также видно, что крутизна высокочастотного склона АЧХ у всех фильтров выше крутизны низкочастотного склона, однако с уменьшением относительной ширины полосы пропускания

крутизна склонов постепенно выравнивается и форма АЧХ приближается к симметричной. Важно отметить, что во всех рассмотренных конструкциях изменением длины шлейфов можно плавно регулировать в небольших пределах ширину полосы пропускания устройств. Однако в четвертой конструкции фильтра при одновременном укорачивании длины всех семи замыкающих шлейфов относительную ширину полосы пропускания можно уменьшить в 3 раза от 90 до 30%.

Экспериментальная проверка работоспособности разработанных сверхширокополосных фильтров проводилась на четвертой из рассмотренных конструкций, в которой все семь шлейфов замкнуты на экран. В качестве подложки экспериментального образца устройства использовалась пластина из поликора толщиной 1 mm. Для определенности были заданы центральная частота полосы пропускания фильтра  $f_0 = 2$  GHz и ее относи-

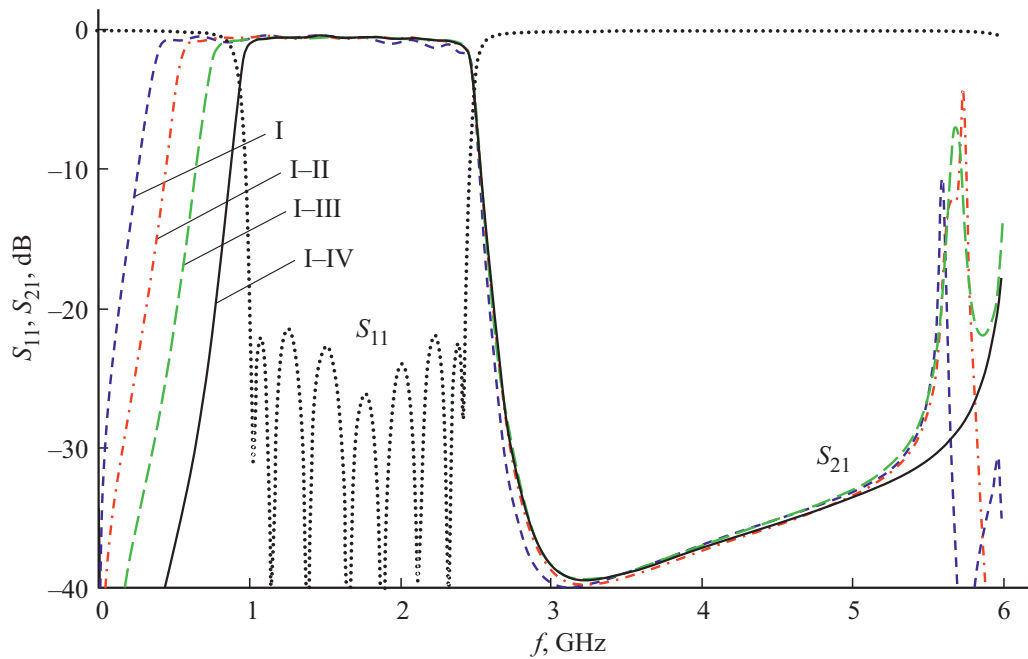
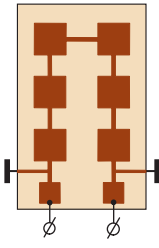
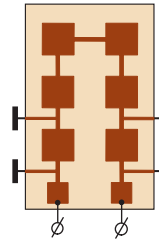
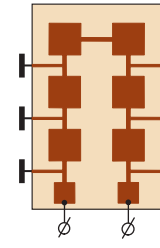
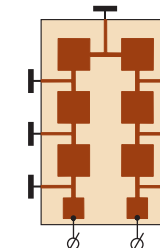


Рис. 2. АЧХ полосно-пропускающих фильтров при замыкании на экран части или всех узких отрезков нерегулярного проводника ФНЧ.

Таблица 1. Параметры амплитудно-частотных характеристик четырех конструкций полосно-пропускающих фильтров

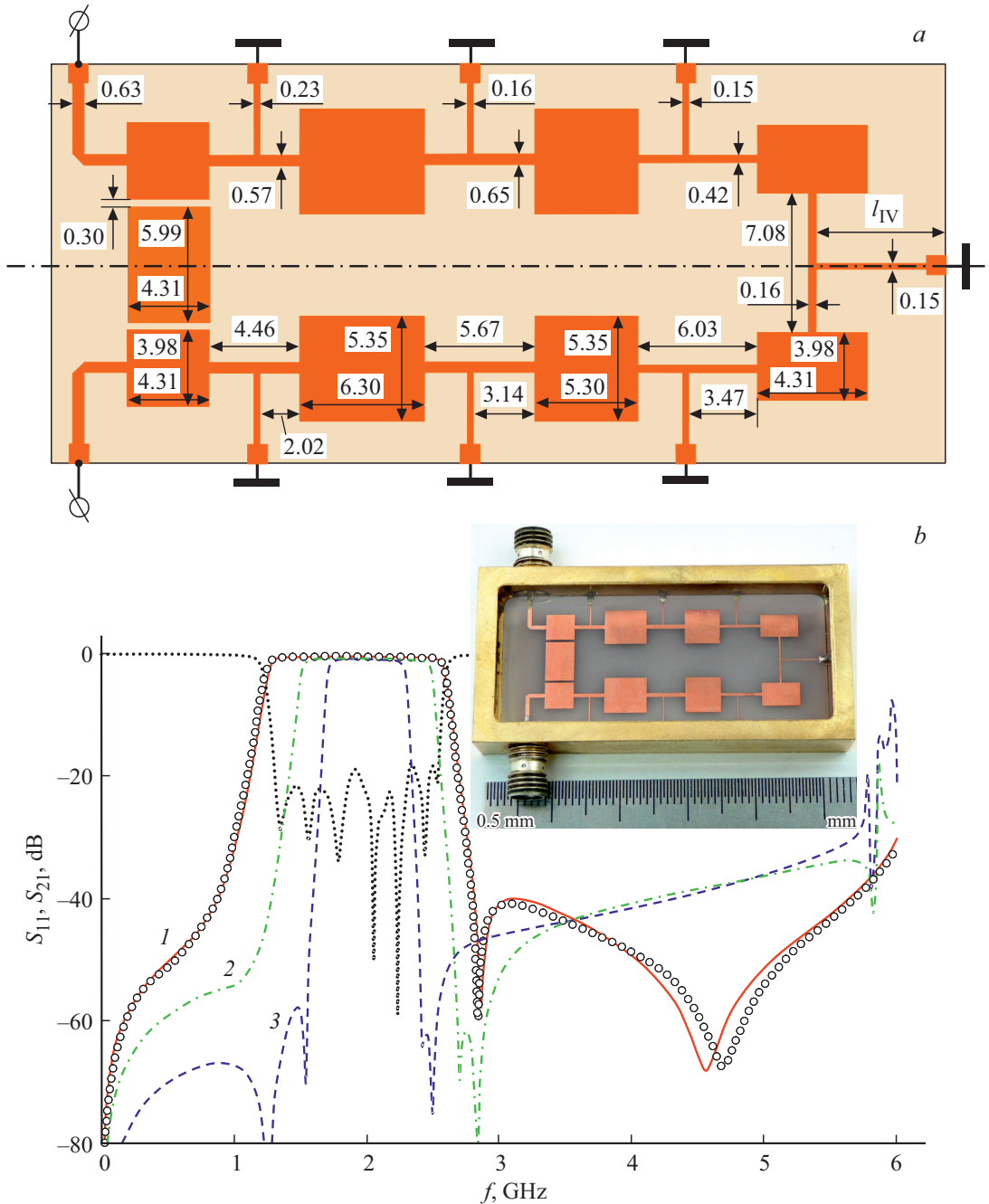
Параметр	Конструкция фильтра			
				
$f_0$ , GHz	1.4	1.5	1.6	1.7
$\Delta f/f_0$ , %	150	130	110	90
$k_l$	3.44	2.57	2.48	2.36
$k_h$	4.63	3.61	3.24	2.85

тельная ширина  $\Delta f/f_0 = 70\%$ . Параметрический синтез конструкции проводился путем численного электродинамического анализа ее 3D-модели в пакете программ „CST Studio Suite“ так, чтобы все максимумы потерь на отражение в полосе пропускания были на уровне  $-20$  dB.

Размеры топологии проводников синтезированной конструкции фильтра представлены на рис. 3, а (в миллиметрах), а его рассчитанная частотная зависимость прямых потерь показана сплошной линией I на рис. 3, б. Важно отметить, что на концах шлейфов рассмотренной конструкции присутствуют квадратные площадки размером  $1 \times 1$  mm для увеличения прочности проводников при пайке, как и на концах портов, которые для удобства

подключения фильтра выведены на противоположные стороны подложки. Отметим также, что в фильтре между широкими отрезками проводников входного и выходного резонаторов добавлен прямоугольный проводник такой же длины, имеющий зазоры с ними по  $0.3$  mm (рис. 3, а). Проводник обеспечивает дополнительную связь между этими резонаторами, благодаря которой вблизи высокочастотного склона АЧХ формируется полюс затухания [9,10], значительно увеличивающий крутизну склона, что хорошо видно на рис. 3, б.

Конструктивные параметры (рис. 3, а), полученные в результате синтеза фильтра по заданным параметрам полосы пропускания, использовались при изготовлении топологии проводников на металлизированной подложке



**Рис. 3.** *a)* Топология проводников с размерами (в мм) регулярных участков синтезированного фильтра. *b)* Линии — частотные зависимости прямых потерь фильтров с  $\Delta f/f_0 = 70$  (1), 50 (2) и 30% (3). Точки — измеренные АЧХ экспериментального образца фильтра с  $\Delta f/f_0 = 70\%$ . На вставке — его фотография.

из поликора размером  $46 \times 21$  мм. Полученная микрополосковая структура припаивалась нижним основанием (экраном) ко дну металлического корпуса, а затем контактные площадки шлейфов припаивались к боковым стенкам корпуса. Фотография изготовленного экспериментального образца представлена на вставке к рис. 3, *b*. Измеренные на векторном анализаторе цепей R&S ZVA-40 частотные зависимости прямых потерь  $S_{21}$  и потерь на отражение  $S_{11}$  показаны на рис. 3, *b* светлыми точками и пунктиром соответственно. Отметим

не только достаточно хорошее согласие рассчитанных и измеренных частотных характеристик фильтра, но и одинаковые в теории и эксперименте значения минимальных потерь в полосе пропускания устройства  $L_{\min} = 0.4$  dB.

Как было отмечено выше, одновременное укорачивание длин всех шлейфов в рассматриваемой конструкции приводит к уменьшению ширины ее полосы пропускания. На рис. 3, *b* представлены АЧХ фильтров, имеющих относительную ширину полосы пропускания

**Таблица 2.** Параметры АЧХ фильтров на основе конструкции со всеми замкнутыми на экран шлейфами длиной  $l_I-l_{IV}$ , настроенных на центральную частоту полосы пропускания 2 GHz

$l_{III}, \text{ mm}$	$l_{IV}, \text{ mm}$	$\Delta f/f_0, \%$	$L_{\min}, \text{ dB}$	$k_I$	$k_h$
4.71	6.65	70	0.4	2.85	4.00
1.78	2.80	50	0.7	3.06	4.14
1.06	1.70	30	0.9	3.22	4.46

50% (линия 2) и 30% (линия 3). Заметим, что в конструкциях этих фильтров из-за малой длины шлейфов (табл. 2) потребовалось отрезки узких проводников, которые шлейфами соединяются с экраном (рис. 3, а), сместить от центров к краям широких проводников. При этом расстояние от краев широких проводников до краев подложки всегда превышало 1 mm, т.е. было больше ее толщины. Для объективности сравнения характеристик фильтры настраивались параметрическим синтезом на ту же центральную частоту  $f_0 = 2 \text{ GHz}$  также в пакете программ „CST Studio Suite“.

В табл. 2 для фильтров, амплитудно-частотные характеристики которых представлены на рис. 3, б, приведены не только длины шлейфов, но и основные параметры АЧХ. Как и следовало ожидать, уровень минимальных потерь в полосе пропускания  $L_{\min}$  с уменьшением ее ширины монотонно растет. Крутизна высокочастотного склона АЧХ  $k_h$  у всех фильтров существенно больше  $k_I$  благодаря полюсу затухания, образованному за счет специально созданной связи между крайними резонаторами. Однако с уменьшением ширины полосы пропускания фильтра зазоры между широкими проводниками внутренних резонаторов микрополосковой структуры уменьшаются, при этом образуются дополнительные связи между несоседними резонаторами, а в результате на АЧХ фильтров появляются новые полюса, которые увеличивают крутизну низкочастотного склона.

Таким образом, разработаны новые конструкции полосно-пропускающих фильтров на основе микрополоскового ФНЧ, состоящего из чередующихся отрезков широких (низкоомных) и узких (высокоомных) проводников, в котором часть или все высокоомные проводники соединены шлейфами с экраном. Исследования таких конструкций показали возможность реализации на их основе фильтров с относительными ширинами полос пропускания от 30 до 150%, отличающихся простотой и высокой технологичностью в изготовлении. При этом устройства обладают сравнительно высокими частотно-селективными свойствами, что обусловлено легкой возможностью создавать в разработанных конструкциях дополнительные связи между несоседними резонаторами, благодаря которым на частотных зависимостях прямых потерь появляются полюса затухания, значительно увеличивающие крутизну склонов АЧХ. Измеренные характеристики экспериментального образца фильтра

с относительной шириной полосы пропускания 70%, изготовленного на керамической подложке из поликора, показали хорошее согласие с расчетными характеристиками, полученными с помощью электродинамического анализа 3D-модели конструкции. Приведенные выше факты указывают на перспективность использования предложенных конструкций для создания сверхширокополосных фильтров, в которых существует большая потребность, в частности, в высокоскоростных системах радиосвязи.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание FEFE-2020-0013).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C.-L. Hsu, F.-C. Hsu, J.-T. Kuo, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (Long Beach, CA, 2005), p. 679–682. DOI: 10.1109/MWSYM.2005.1516698
- [2] Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, Ан.А. Лексиков, Я.Ф. Балва, Е.О. Грушевский, Письма в ЖТФ, **46** (16), 7 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49845.18357
- [3] Ya.A. Kolmakov, I.B. Vendik, in *35th Eur. Microwave Conf.-2005. Conf. Proc.* (Paris, 2005), vol. 1, p. 21–24. DOI: 10.1109/EUMC.2005.1608783
- [4] S. Shang, B. Wei, B. Cao, X. Guo, X. Wang, L. Jiang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29** (4), 1500105 (2019). DOI: 10.1109/TASC.2018.2880331
- [5] Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, Ан.А. Лексиков, В.Ф. Шабанов, ДАН, **474** (6), 682 (2017). DOI: 10.7868/S0869565217180062
- [6] R. Zhang, S. Luo, L. Zhu, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **65** (3), 815 (2017). DOI: 10.1109/TMTT.2016.2636825
- [7] Y. Zhu, K. Song, Y. Fan, *IEEE Access*, **7**, 117219 (2019). DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928342
- [8] K.-D. Xu, D. Li, Y. Liu, *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, **29** (2), 107 (2019). DOI: 10.1109/LMWC.2019.2891203
- [9] Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов, ДАН, **485** (1), 27 (2019). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485127-32>
- [10] B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, Y.F. Bal'va, V.V. Tyurnev, A.A. Leksikov, R.G. Galeev, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **56** (9), 2021 (2014). DOI: 10.1002/mop
- [11] Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, В.В. Тюрнев, Радиотехника и электроника, **49** (11), 1315 (2004).