

11. Zikiy A.N., Pirogov D.Yu., Chernyshova O.A., Sal'nyy I.A. Generator s dielektricheskim rezonatorom [Generator with a dielectric resonator], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki, seriya Obshchie voprosy radioelektroniki* [Questions of special radio electronics, series General Questions of Radio Electronics], 2008, No. 1, pp. 142-146.
12. Zikiy A.N., Shipulin M.V. Tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Transistor autogenerator stabilized by a dielectric resonator], *Mater. 4 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sovremennye problemy radioelektroniki»* [Materials of the 4th International scientific conference "Modern problems of radio electronics"]. Rostov-on-Donu, YuRGUES, 2012, pp. 285-287.
13. Brovchenko S.P., Zikiy A.N., Chernyshova O.A. SVCh tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Microwave transistor generator stabilized by a dielectric resonator], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 182-184.
14. Zikiy A.N., Kochubey A.S. Eksperimental'noe issledovanie geterodinnogo modulya [Experimental study of a heterodyne module], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6, pp. 189-196.
15. Belov L.A., Khil'kevich V. Generatory SVCh s dielektricheskimi rezonatorami dlya stabilizatsii chastoty [Microwave generators with dielectric resonators for frequency stabilization], *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics. The science. Technology. Business], 2006, No. 7.
16. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Sivokoz E.V. Eksperimental'noe issledovanie dvukh avtogeneratorov s dielektricheskimi rezonatorami [Experimental study of two autogenerators with dielectric resonators], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2015, No. 10, pp. 198-209.
17. Bazhilov V.A. Raschet i issledovanie tsilindricheskikh ekranirovannykh SVCh i KVCh kolebatel'nykh sistem na osnove dielektricheskikh rezonatorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation and investigation of cylindrical shielded microwave and HF oscillatory systems based on dielectric resonators: abstract of the cand. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod, NGTU, 2007, 20 p.
18. Tsarapkin D.P. Metody generirovaniya SVCh kolebaniy s minimal'nym urovnem fazovykh shumov: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of generating microwave oscillations with a minimum level of phase noise: abstract of the dr. of eng. sc. diss.]. Moscow: MEI, 2004.
19. Patent SShA №6.714.089 High frequency signal source and method of generating same using dielectric resonator oscillator (DRO) circuit. 30.03.2004 [US Patent No. 6,714,089 A source of a high-frequency signal and a method for generating it using a dielectric resonator generator (DRO) circuit. 30.03.2004].
20. Patent SShA №4.386.326. Dielectric-resonator-tuned Microwave solid state oscillator. 30.05.1983 [US Patent No.4.386.326. Microwave solid-state generator tuned to a dielectric resonator. 30.05.1983].
21. Radiopere dayushchie ustroystva [Radio transmitting devices], ed. by O.A. Chelnokova. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 256 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Зикий Анатолий Николаевич – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Кочубей Алексей Сергеевич – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Kochubey Alexey Sergeevich – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; phone: +79896270939; master's degree; design engineer, category 2.

УДК 621.372.852

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-191-202

Д.В. Харланов, А.В. Лабынцев

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРА НА ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В задачах проектирования микрополосковых фильтров большую роль играет удачный выбор начального приближения для значений искомым геометрических размеров элементов фильтра. Особенно это важно, если проектируемый фильтр обладает новыми конструктивными признаками, и методы синтеза этого устройства еще находятся на стадии разработки. В работе рас-

сматриваются некоторые результаты проектирования полосовых микрополосковых фильтров, состоящих из противоположенных шпилечных резонаторов с металлизированным отверстием в середине каждого резонатора. Такое техническое решение позволяет существенно расширить полосу заграждения фильтра за счет подавления паразитной полосы пропускания, которая неизбежно формируется в традиционном фильтре на полуволновых шпильках в связи с возникновением резонанса на удвоенной частоте основной полосы пропускания. Введение в резонатор металлизированных отверстий приводит к необходимости исследования свойств этих резонаторов и к определению потенциальных возможностей полосового фильтра, состоящего из таких резонансных элементов. Важнейшей характеристикой полосового фильтра, задаваемой в любом техническом задании на проектирование, является ширина основной полосы пропускания и ее положение на частотной оси. В работе получены оценки относительной ширины полосы пропускания фильтра в зависимости от ширины реализуемых значений полосового проводника, образующего шпильку, и от зазора между плечами шпильки. В результате определяются потенциальные возможности рассматриваемых фильтров по реализуемой или относительной ширине основной полосы пропускания. Под физической реализуемостью фильтра понимается возможность технологически реализовать значения всех геометрических размеров элементов фильтра, исходя из накладываемых на них разумных ограничений. Эти ограничения определяются технологическими допусками для минимальных геометрических размеров и габаритными и частотными ограничениями для максимальных размеров. В работе определен диапазон реализуемых геометрических размеров. Методика решения задачи синтеза фильтра основана на переходе от фильтра к $2n$ -полюснику и в рамках данной работы она используется как инструмент для определения потенциальных возможностей исследуемых фильтров в электродинамической среде моделирования HFSS. Реализуемые значения относительной ширины полосы пропускания фильтра лежат в пределах от 10 % до 32 %, что позволяет отнести данный тип фильтра к устройствам с умеренной шириной полосы пропускания. Приводятся результаты проектирования фильтров на двух шпилечных резонаторах для случаев предельно узких и предельно широких полос пропускания.

Микрополосковый фильтр; шпилечный резонатор; металлизированное отверстие; полоса пропускания; полоса заграждения.

D.V. Kharlanov, A.V. Labyntsev

POTENTIAL CAPABILITIES OF THE FILTER ON HAIRPIN RESONATORS WITH METALLIZED HOLES

In the design tasks of microstrip filters, a good choice of the initial approximation for the values of the required geometric dimensions of the filter elements plays an important role. This is especially important if the filter being designed has new design features and synthesis methods for this device are still under development. The paper considers some results of the design of band-pass microstrip filters consisting of counter-directional hairpin resonators with a metallized hole in the middle of each resonator. Such a technical solution makes it possible to significantly expand the barrier band of the filter by suppressing the parasitic bandwidth, which is inevitably formed in a traditional filter on half-wave resonators due to the occurrence of resonance at twice the frequency of the main bandwidth. The introduction of metallized holes into the resonator leads to the need to study the properties of these resonators and to determine the potential capabilities of a bandpass filter consisting of such resonant elements. The most important characteristic of a bandpass filter, specified in any design specification, is the width of the main bandwidth and its position on the frequency axis. Estimates of the relative bandwidth of the filter are obtained depending on the width of the microstrip conductor forming the hairpin and on the gap between the half of the hairpin. As a result, the potential capabilities of the filters in question are determined by the relative bandwidth they implement. The physical feasibility of the filter is understood as the ability to technologically realize the values of all geometric dimensions of the filter elements, based on reasonable restrictions imposed on them. These limits are determined by technological tolerances for minimum geometric dimensions and dimensional and frequency limits for maximum dimensions. The paper defines a range of realizable geometric dimensions. The method of solving the problem of filter synthesis is based on the transition from a filter to a $2n$ pole, and in this work it is used as a tool to determine the potential capabilities of the studied filters in the electrodynamic environment of HFSS modeling. The realized values of the relative bandwidth of the filter range from 10% to 32%, which makes it possible to attribute this type of filter to devices with moderate bandwidth. The results of designing filters on two hairpin resonators for cases of extremely narrow and extremely wide bandwidth are presented.

Microstrip filter; hairpin resonator; metallized hole; bandwidth; barrier strip.

Введение. В настоящее время полосовые микрополосковые фильтры (МПФ) широко используются для частотной селекции сигналов малой мощности в диапазоне от 300 МГц до 20 ГГц. Анализ последних публикаций [1–6] в области разработки МПФ, а также методов их проектирования показал, что данная тематика по-прежнему актуальна.

В отдельный класс полосовых МПФ можно выделить фильтры, состоящие из так называемых шпилечных резонаторов, которые представляют собой полуволновые резонаторы, свернутые пополам. Существенным недостатком традиционных шпилечных фильтров является наличие второго резонанса на частоте воздействия, при которой на геометрической длине резонатора укладывается целая длина волны в линии. Это приводит к возникновению первой паразитной полосы пропускания в окрестности частоты, равной удвоенному значению средней частоты основной полосы пропускания (ОПП), а это, в свою очередь, существенно сужает верхнюю полосу заграждения фильтра.

Для расширения полосы заграждения ранее было предложено решение [7–12], позволяющее устранить указанную паразитную полосу пропускания путем преобразования простого полуволнового резонатора в совокупность двух четвертьволновых резонаторов за счет введения в центр резонатора металлизированного отверстия. Это позволило расширить полосу заграждения фильтра более чем в два раза.

С другой стороны, одним из основных требований, предъявляемых к характеристике фильтра, является значение относительной ширины ОПП устройства. Эту заданную ширину ОПП фильтр должен обеспечить при реализуемых и разумных геометрических параметрах конструкции. Например, гребенчатый микрополосковый фильтр даже при минимальных значениях зазоров между резонаторами, не позволяет реализовать полосу пропускания более 15%, а фильтр на встречных стержнях легко реализует полосу в 50–60%. Поэтому еще на начальном этапе проектирования важно знать потенциальные возможности конкретного фильтра по диапазону реализуемых им значений относительной ширины ОПП.

Кроме того, в начале проектирования разработчику фильтра желательно знать приблизительные первоначальные значения ширины резонаторов и зазоров между ними, при которых заданная ширина ОПП реализуется. Такая информация уже в самом начале разработки фильтра позволит выбрать хорошее начальное приближение для искомых геометрических размеров, что существенно сократит продолжительность проектирования и практически всегда гарантированно приведет к успешному результату.

В данной работе приводятся оценки реализуемых значений относительной ширины ОПП одного шпилечного резонатора с металлизированным отверстием в зависимости от ширины резонатора и зазора между плечами шпильки. Тем самым определяются потенциальные возможности рассматриваемых фильтров по реализуемой ими относительной ширине ОПП. Под реализуемостью фильтра понимается возможность технологически реализовать значения геометрических размеров его элементов, исходя из накладываемых на них разумных ограничений. Эти ограничения определяются технологическими допусками для минимальных геометрических размеров и габаритными и частотными ограничениями для максимальных размеров.

Постановка задачи и методика исследования. На рис. 1 приведен чертеж фильтра, образованного двумя шпилечными резонаторами с металлизированными отверстиями в каждом резонаторе.

Задача исследования заключается в определении относительной ширины полосы пропускания фильтра при заданных значениях ширины проводника w и зазора между резонаторами s_1 и s_2 . Чтобы определить фактическую ширину полосы пропускания фильтра при заданной ширине полосковых проводников и заданном зазоре между ними, необходимо полностью решить задачу синтеза этого фильтра. В противном случае характеристика фильтра не будет оптимальной, а, следовательно, ширина полосы пропускания устройства будет определена неправильно. Важно, что абсолютное значение длины резонансных элементов l_1 и l_2 на результаты решения поставленной задачи не влияет, поскольку относительная ширина полосы пропускания не зависит от длины резонаторов.

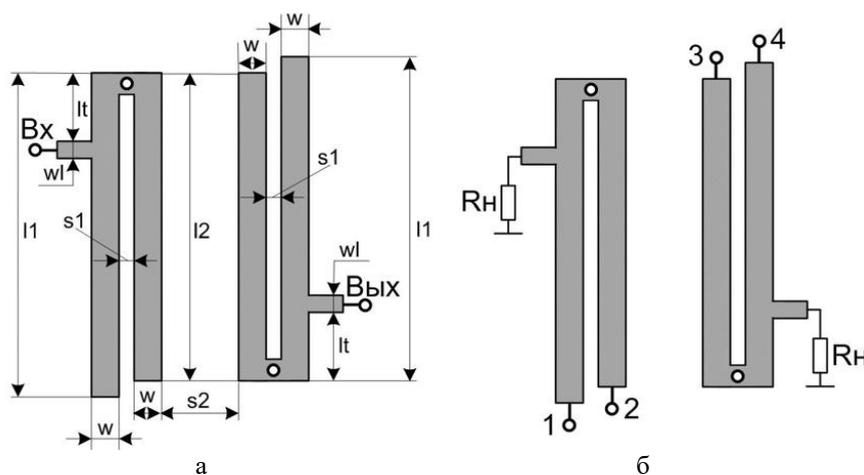


Рис. 1. Чертежи устройств из двух шпилек: а – фильтр; б – 8-полосник

Методика решения задачи синтеза фильтра (рис. 1,а) основана на переходе к $2n$ -полоснику (рис. 1,б) и рассмотрена в работах [13–19]. В данной работе эта методика дополнительно не рассматривается, а используется лишь как инструмент для определения потенциальных возможностей исследуемых фильтров в электродинамической среде моделирования HFSS [20]. На рис. 2 приведена конструктивная модель 8-полосника, реализованная в HFSS в соответствии с рис. 1,б).

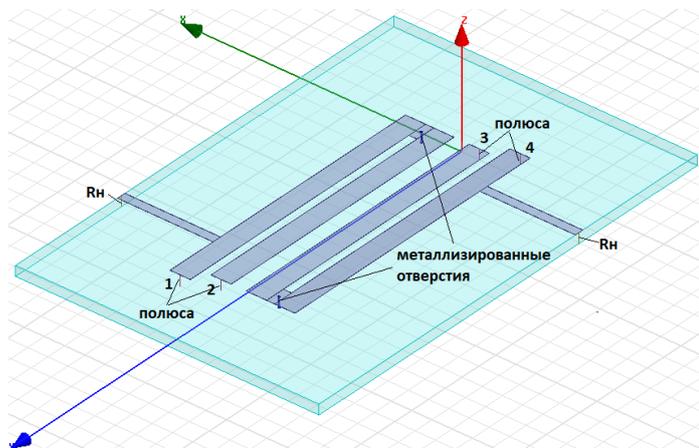


Рис. 2. Модель 8-полосника в HFSS

Определение диапазона реализуемых геометрических размеров. Вопрос реализуемости геометрических размеров в первую очередь относится к ширине и длине резонатора и к зазору между резонаторами.

Во-первых, минимальные значения ширины резонаторов w_{min} и зазоров s_{min} между ними определяются технологическими допусками на изготовление микрополосковых элементов. При любом способе изготовления платы, напыление это или травление, погрешность реализации линейных размеров полосковых проводников составляет около 5 микрон. Это говорит о том, что задавать размеры проводников с точностью более 5 микрон бессмысленно, так как это не удастся реализовать технологически в реальном фильтре. С другой стороны, те же абсолютные допуски в 5 микрон ограничивают минимальные размеры ширины полосковых проводников и зазоров между ними, поскольку

при соизмеримых с допусками значениях геометрических размеров мы получаем недопустимо большие относительные разбросы размеров, резко снижающие повторяемость характеристик фильтра. Как правило, полагают, что минимальная ширина полоскового проводника w_{min} и минимальный зазор между ними s_{min} составляют 100 мкм.

Во-вторых, максимальные размеры ширины полосковых элементов w_{max} и зазоров s_{max} тоже имеют разумные ограничения, поскольку они, прежде всего, определяют габариты фильтра. Кроме того, ширина резонатора должна быть в 4-5 раз меньше, чем его длина, которая, в свою очередь, определяется частотным диапазоном ОПП фильтра. Так для частоты 1 ГГц длина четвертьволнового резонатора (при относительной диэлектрической проницаемости подложки 10) составляет около 25 мм, и, следовательно, $w_{max} = 5$ мм. При частоте 5 ГГц $w_{max} = 1$ мм, а при 25 ГГц $w_{max} = 200$ микрон. Данный фактор в принципе ограничивает частотный диапазон использования микрополосковой технологии для реализации фильтров 50 гигагерцами, так как на этих частотах $w_{max} = w_{min} = 100$ мкм.

Увеличение зазоров между резонаторами s_{max} , как правило, обеспечивает уменьшение связи между ними, что дает возможность реализации фильтра с узкой полосой пропускания. Однако при проектировании узкополосных фильтров лучше идти по пути выбора подходящего топологического решения, например, использовать гребенчатый фильтр, который потенциально является узкополосным при небольших зазорах между резонаторами, а, следовательно, будет оптимальным результатом с точки зрения компактности устройства. В данной работе при исследовании свойств фильтра, образованного шпилечными резонаторами с металлизированными отверстиями, для определенности положим $s_{max} = 5$ мм.

Итак, диапазоны возможных значений ширины резонаторов и зазоров между ними:

$$w \in [0,1 \text{ мм}, 5 \text{ мм}]; s \in [0,1 \text{ мм}, 5 \text{ мм}]. \quad (1)$$

Конечно, все границы диапазонов (1) при специфических требованиях технического задания на проектирование можно расширить.

Неоднозначность в определении ширины ОПП. Прежде всего, надо определиться, по какому критерию будет определяться ширина полосы пропускания устройства. Здесь возможны различные случаи, которые приведены на рис. 3.

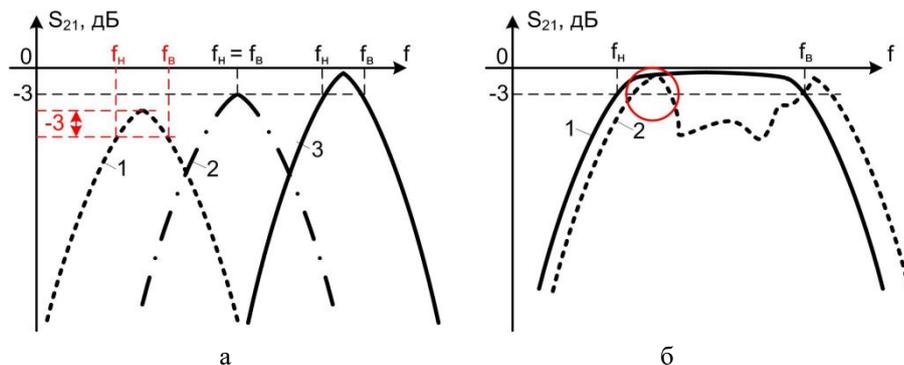


Рис. 3. К определению ширины ОПП в случае: а – узких полос пропускания; б – широких полос пропускания

Количественно относительная ширина ОПП выражается в процентах и определяется как отношение абсолютной ширины ОПП к средней частоте ОПП из соотношения:

$$\delta_{\text{П}} = \frac{2 \cdot (f_{\text{В}} - f_{\text{Н}})}{f_{\text{В}} + f_{\text{Н}}} \cdot 100\%,$$

где $f_{\text{Н}}$, $f_{\text{В}}$ – соответственно нижняя граничная частота и верхняя граничная частота ОПП, определенные по уровню -3 дБ функции $20 \lg S_{21}(f)$.

Прежде всего, на ширину полосы пропускания, независимо от ее ширины, сильно влияет наличие диссипативных потерь (потери на тепло), которые обусловлены ненулевым значением тангенса угла потерь в реальной диэлектрической подложке. Этот фактор не позволяет обеспечить в реальном фильтре нулевой уровень затухания S_{21} ни на одной частоте в пределах полосы пропускания.

Особенно сильно это влияние на функцию $S_{21}(f)$ сказывается в случае узкополосных фильтров. На рис. 3,а представлено три различных варианта характеристик фильтра со сравнительно узкой ОПП. И уже здесь возникает вопрос о том, по какому уровню отсчитывать граничные частоты полосы пропускания – минус 3 дБ функции $20\lg S_{21}(f)$ от нулевого уровня затухания или от уровня начальных потерь. Например, по варианту 1 на рис. 3,а можно считать, что полоса пропускания на уровне минус 3 дБ функции $20\lg S_{21}(f)$, отсчитанного от нулевого уровня, отсутствует, а отсчитанная от уровня начальных потерь (изображено красным цветом) имеет вполне определенные граничные частоты. Важно заметить, что возникновение результирующей характеристики на рис. 3,а возможно не только в случае большого уровня диссипативных потерь, но и в случае, когда не обеспечено надлежащее согласование в пределах полосы пропускания. Видимо, неоднозначность в решении этого вопроса должна сниматься в конкретном ТЗ, где должно быть оговорен и максимальный уровень начальных потерь, и допустимая неравномерность затухания в полосе пропускания, и конкретный уровень затухания, по которому определяются границы полосы пропускания.

Чтобы снять эту неопределенность в нашем исследовании, будем считать, что граничные частоты полосы пропускания определяются по уровню минус 3 дБ от уровня начальных потерь при обеспечении достаточно хорошего согласования.

Что касается сравнительно широкой полосы пропускания, то два возможных варианта характеристики затухания для этого случая изображены на рис. 3,б. Первый случай, представленный сплошной кривой, иллюстрирует хороший результат проектирования фильтра, имеющего сравнительно широкую ФПП. А вот во втором случае, очевидно, что результат проектирования широкополосного фильтра явно не получился. Кстати, с этой ситуацией разработчик может столкнуться не один раз и именно при попытке проектирования узкополосного фильтра. Диапазон частот, выделенный красной окружностью на рис. 3,б, отмечен здесь как диапазон ОПП, заданный по ТЗ. Разработчик, увлекшись подбором геометрии для обеспечения этой необходимой по ТЗ полосы пропускания, не замечает, что в непосредственной близости от нее, чуть выше (как на рис. 3,б или ниже по частоте есть еще одна вредная ПП, наличие которой обесценивает все его усилия.

Приведенные выше рассуждения показывают, что определение ширины ПП фильтра и, тем более, ее предельных значений, не является простой и однозначной задачей.

Результаты исследования. В табл. 1 приведены результаты оценок относительной ширины ОПП одного шпилечного резонатора в зависимости от ширины полоскового проводника, образующего шпильку, и зазора между резонансными плечами шпильки. На рис. 4 представлены эти зависимости в виде семейства графиков.

Таблица 1

Оценки относительной ширины ОПП одной шпильки V , %

$S1=S$, мм \ W , мм	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0
0,5	25	24,7	22,3	14	11
1,0	30	28	25,4	16,3	12,6
2,0	34	32	28,6	19,3	15,3
3,5	37	35,4	31,6	22,1	17,8
5,0	40	38	33,5	24	19,4

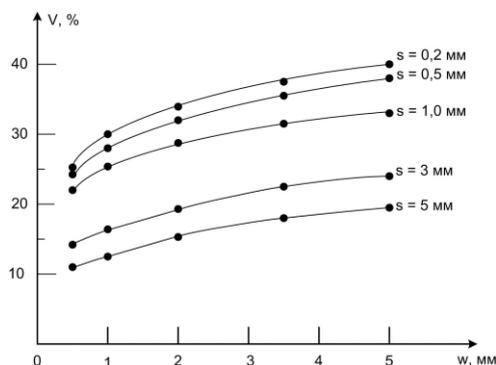


Рис. 4. Зависимости относительной ширины полосы пропускания шпилечного резонатора от ширины проводника и зазора между плечами

Представленные результаты показывают, что реализуемые ширины полос пропускания одного шпилечного резонатора с металлизированным отверстием на сгибе шпильки лежат в пределах от 10 до 40%. Предельные значения ширины полосы пропускания достижимы в двух крайних случаях: минимальная ширина ОПП ($\approx 10-11\%$) реализуется при максимальном зазоре $s_{max} = 5$ мм и минимальной ширине полоскового проводника $w_{min} = 0,5$ мм. И наоборот, максимальная ширина ОПП ($\approx 40\%$) реализуется при минимальном зазоре $s_{min} = 0,2$ мм и максимальной ширине полоскового проводника $w_{max} = 5$ мм.

Графики на рис. 4 позволяют разработчику обоснованно выбрать первоначальные геометрические размеры шпильки по относительной ширине ЗПП. Например, при заданной $V = 20\%$ и ширине полоскового проводника $w = 2$ мм можно выбрать начальное значение $s_0 = 2,5$ мм, а при $w = 4$ мм начальное значение s_0 уже будет $s_0 = 4$ мм. Очевидно, что такой различный выбор начальных приближений приведет к существенно различным результатам решения задачи синтеза, и габариты фильтра во втором случае будут в два раза больше, чем в первом. Это еще раз говорит о неоднозначности решения задачи синтеза, что в свою очередь дает возможность оптимизировать решение по различным критериям.

Ширина ОПП фильтра из двух шпилек. Ранее было показано, что минимальная ширина ОПП ($\approx 10\%$) реализуется одной шпилькой при максимальном зазоре $s_{max} = 5$ мм и минимальной ширине полоскового проводника $w_{min} = 0,5$ мм, а максимальная ширина ОПП ($\approx 40\%$) – при минимальном зазоре $s_{min} = 0,2$ мм и максимальной ширине полоскового проводника $w_{max} = 5$ мм. Приведем результаты исследования влияние зазора между двумя шпильками на ширину ОПП в этих двух крайних случаях.

При рассмотрении исследуемой конструкции устройства, состоящего из двух шпилек и представленной на рис. 1, для упрощения задачи будем считать, что фильтр обладает центральной геометрической симметрией, и что все плечи шпилек имеют одинаковую ширину w . Чертежи указанной конструкции фильтра и соответствующего 8-полосника, а также модель 8-полосника для осуществления синтеза фильтра, реализованная в HFSS, приведены на рис. 1.

Исследование предельно узких полос пропускания. Синтез фильтра при $s_1 = 5$ мм и $w = 0,5$ мм дал приемлемый результат при $s_2 = 3$ мм. Однако характеристики фильтра с соответствующими размерами, представленные на рис. 5, показывают, что начальные потери в ОПП составили 2,8 дБ, а ширина ОПП, определенная по уровню – 5,8 дБ, составила 7%.

Существенное увеличение зазора s_2 с 3 до 7 мм привело к росту начальных потерь с 3 до 10 дБ, и ОПП фильтра практически не сформировалась. Исходя из этих результатов, можно сделать вывод о том, что при узких полосковых проводниках, образующих шпильку, начальные вносимые потери слишком велики за счет низкой добротности резонаторов.

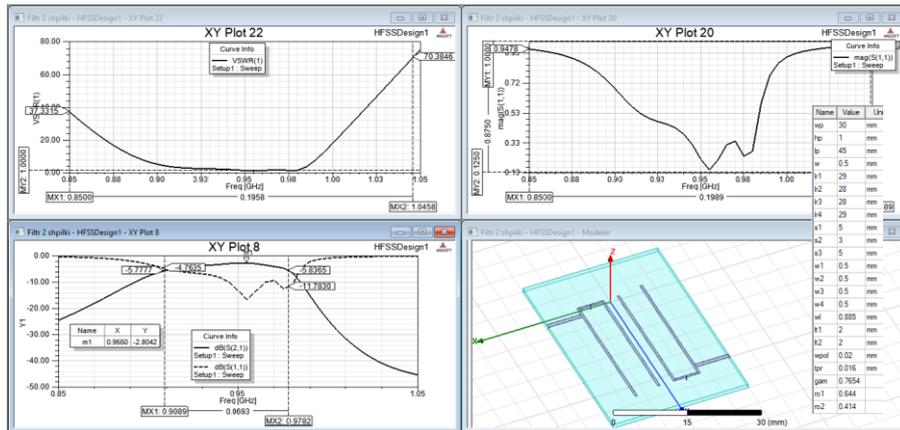


Рис. 5. Характеристики фильтра при $w = 0,5$ мм, $s_1 = 5$ мм и $s_2 = 3$ мм

Увеличение ширины полосковых проводников в два раза (с 0,5 до 1 мм) существенно изменило ситуацию. Результаты проектирования для $w = 1$ мм приведены на рис. 6.

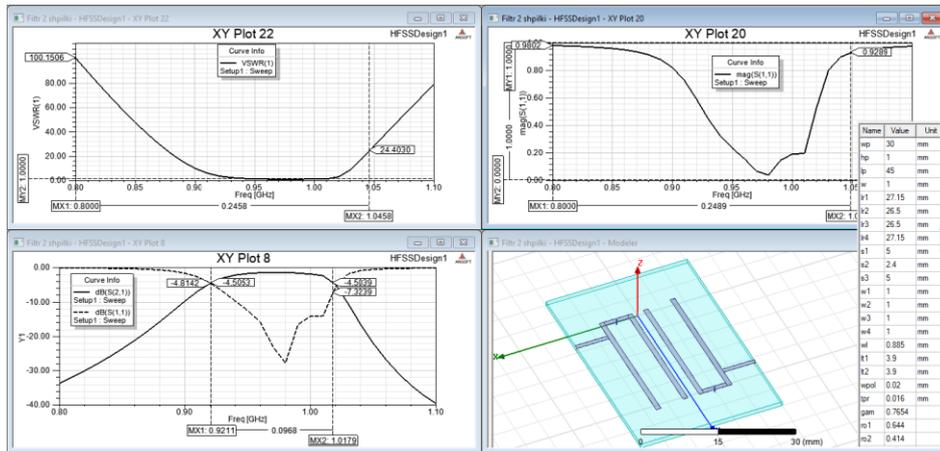


Рис. 6. Характеристики фильтра при $w = 1$ мм, $s_1 = 5$ мм и $s_2 = 2,4$ мм

Ширина ОПП, согласно результатам на рис. 8, составила 10,1%.

Таким образом, исследование предельно узких полос пропускания, реализуемых рассматриваемыми фильтрами, показало, что с ростом ширины полосковых проводников, образующих шпильку, при сравнительно больших зазорах ширина ОПП растет согласно графикам, приведенным на рис. 4. Результаты проектирования фильтров на двух резонаторах при $w = 2$ мм показали ширину ОПП $\delta_\phi = 14\%$, а при $w = 4$ мм относительная ширина ОПП составила $\delta_\phi = 23\%$.

Исследование предельно широких полос пропускания. Исходя из результатов табл. 1 фильтр с максимальной шириной ОПП должен иметь максимальную ширину резонаторов и минимальный зазор между ними. В результате проектирования 8-полосника при $s_1 = 0,2$ мм и $w = 5$ мм не удалось получить удовлетворительный результат, поэтому было взято значение $w = 4$ мм и после нескольких итераций был получен приемлемый результат, представленный на рис. 7.

На рис. 8 приведены характеристики фильтра, размеры которого соответствуют размерам 8-полосника на рис. 7.

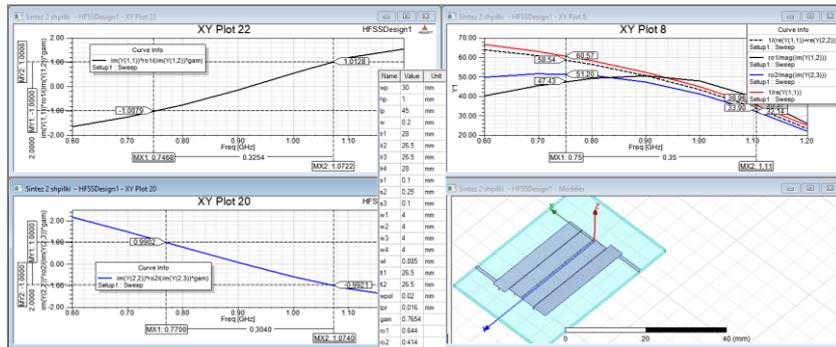


Рис. 7. Характеристики 8-полосника при $s_1 = 0,1$ мм и $w = 4$ мм

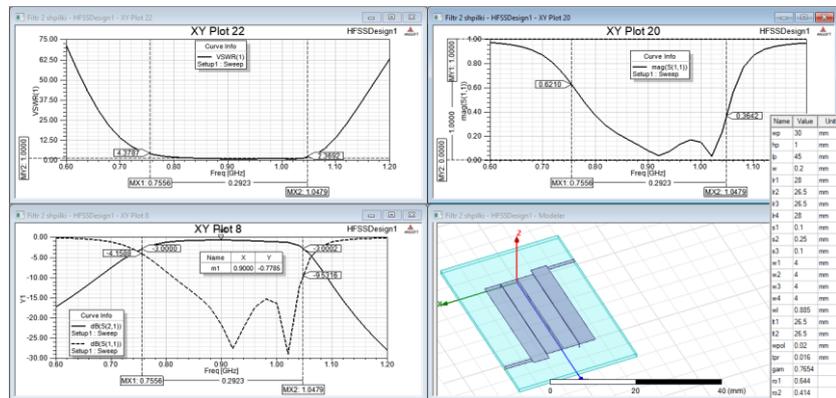


Рис. 8. Характеристики фильтра при $s_1 = 0,1$ мм и $w = 4$ мм

Ширина ФПП фильтра составляет

$$\delta_{\phi} = \frac{2 \cdot (1,05 - 0,76)}{1,05 + 0,76} \cdot 100\% = 32 \%$$

Ширина ОПП несколько меньше, чем предполагалось по данным из табл. 1, поэтому был выполнен синтез еще для случая $s_1 = 0,2$ мм и $w = 5$ мм. Результат синтеза приведен на рис. 9. Он показывает, что ширина ОПП фильтра практически не изменилась и составляет те же 32%.

$$\delta_{\phi} = \frac{2 \cdot (0,98 - 0,71)}{0,98 + 0,71} \cdot 100\% = 32 \%$$

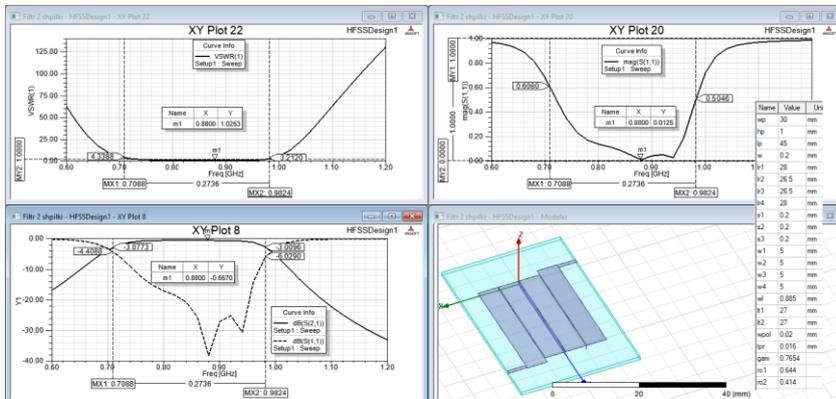


Рис. 9. Результирующие характеристики широкополосного фильтра

Заключение. В результате проведенного исследования были установлены потенциальные возможности фильтра на противонаправленных шпильках с металлизированными отверстиями. Реализуемые значения относительной ширины полосы пропускания фильтра лежат в пределах от 10 % до 32 %, то есть данный тип фильтра относится к устройствам с умеренной шириной полосы пропускания. Полученные результаты позволят разработчику данного фильтра осознанно выбрать начальные значения геометрических размеров устройства по заданной ширине полосы пропускания фильтра.

Материалы статьи подготовлены при поддержке проекта № ВнГр/23-01-РТ «Исследование программно определяемых радиосистем» в Южном федеральном университете".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аристархов Г.М., Кириллов И.Н.* Компактные микрополосковые фильтры с повышенной частотной избирательностью на основе полуволновых резонаторов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 40-44. – DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166122.
2. *Аристархов Г.М., Кириллов И.Н., Корчагин А.И., Кувишинов В.В.* Компактные высокоизбирательные микрополосковые фильтры на свернутых сонаправленных шпильчных резонаторах // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 126-137. – DOI: 10.18127/j00338486-202104-14.
3. *Аристархов Г.М., Аринин О.В., Кириллов И.Н.* Многополосные полосно-пропускающие микрополосковые фильтры на двух сонаправленных шпильчных резонаторах // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 4-9.
4. *Сержантов А.М.* Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устройства на их основе с улучшенными характеристиками: дисс. ... д-ра техн. наук. – Красноярск, 2015.
5. *Патент № 2775868* С1. Рос. Федерация, 2022. Высокоселективный микрополосковый полосно-пропускающий фильтр / *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Ходенков С.А.*
6. *Патент № 2797166* С1. Рос. Федерация, 2023. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр / *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Ходенков С.А.*
7. Patent US5066933. Band-pass filter. Publication Date 19.11.1991.
8. Patent US20020057143. High frequency filter, filter device, and electronic apparatus incorporating the same. Publication Date 16.05.2002.
9. *Xiao F., Norgren M.* Compact third-order microstrip bandpass filter using hybrid resonators // Clinics in colon and rectal surgery. – Thieme Medical Publishers, 2011. – Vol. 19. – P. 93-106.
10. *Агафонов В.М., Лабынцев В.А., Лабынцев А.В.* Микрополосковый гребенчатый фильтр. А.С. СССР №1262602. Опубл. В БИ, 1986, № 37.
11. *Лабынцев А.В., Игнатьев В.В., Васильев В.В., Михайловский Вит. А., Харланов Д.В.* Проектирование фильтра из шпильчных резонаторов с металлизированными отверстиями с помощью программной системы // Программные продукты и системы. – 2023. – Т. 36, № 4. – С. 668-677. – DOI: 10.15827/0236-235X.142.668-677. <http://www.swsys.ru/archive/2023-4.pdf>.
12. *Obukhovets V.A., Labyntsev A.V., Kharlanov D.V., Ponomarev N.E., Sarzhanov A.N.* Example of Filter Synthesis on Two Anti-directional Stud Resonators with One Metalized Hole in Each Resonator // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2023. – P. 160-163. – DOI: 10.1109/rsemw.58451.2023.10202019.
13. *Агафонов В.М., Лабынцев А.В.* Синтез микрополосковых гребенчатых фильтров // Известия Вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1987. – № 2. – С. 95. Рукопись депонирована в ВИНТИ 29.08.86. №6286-В86.
14. *Агафонов В.М., Лабынцев А.В.* Синтез микрополосковых фильтров заданной структуры // Все-союзная научно-техническая конференция «Проблемы математического моделирования и реализации радиоэлектронных систем СВЧ на объемных интегральных схемах: Тезисы докладов. – М., 1987. – С. 73.
15. *Агафонов В.М.* Полиномиальные фильтры СВЧ // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т. 15, № 10. – С. 2191-2193.
16. *Лабынцев А.В.* Пассивные селективные устройства СВЧ на базе многомодовых микрополосковых линий: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТРТИ, 1987. – 201 с.
17. *Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: пер. с англ. / под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
18. *Labyntsev A.V., Poveshenko L.I., Kharlanov D.V.* Two-Stage Design of Microstrip Filters from Arbitrary Configuration Resonators // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019. – P. 172-175. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792770>. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792770.

19. *Labyntsev A.V., Poveshenko L.I., Kharlanov D.V.* Microstrip Filter with Extended Barrier // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019. – P. 176-179. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792722>. – DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792722.
20. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчёт антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М.: ЗАО «НПП „Родник“», 2009. – 256 с.

REFERENCES

1. *Aristarkhov G.M., Kirillov I.N.* Kompaktnye mikropoloskovye fil'try s povyshennoy chastotnoy izbiratel'nost'yu na osnove poluvolnovykh rezonatorov [Compact microstrip filters with increased frequency selectivity based on half-wave resonators], *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, signal generation and processing], 2020, Vol. 11, No. 2, pp. 40-44. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166122.
2. *Aristarkhov G.M., Kirillov I.N., Korchagin A.I., Kuvshinov V.V.* Kompaktnye vysokoizbiratel'nye mikropoloskovye fil'try na svernutykh sonapravlennykh shpilechnykh rezonatorakh [Compact highly selective microstrip filters on folded co-directional stud resonators], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2021, Vol. 85, No. 4, pp. 126-137. DOI: 10.18127/j00338486-202104-14.
3. *Aristarkhov G.M., Arinin O.V., Kirillov I.N.* Mnogopolosnye polosno-propuskayushchie mikropoloskovye fil'try na dvukh sonapravlennykh shpilechnykh rezonatorakh [Multiband band-pass microstrip filters on two co-directional stud resonators], *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, signal generation and processing], 2023, Vol. 14, No. 1, pp. 4-9.
4. *Serzhantov A.M.* Rezonansnye poloskovye struktury i chastotno-selektivnye ustroystva na ikh osnove s uluchshennymi kharakteristikami: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Resonant strip structures and frequency-selective devices based on them with improved characteristics: dr. of eng. sc. diss.]. Krasnoyarsk, 2015.
5. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Khodenkov S.A.* Patent № 2775868 C1. Ros. Federatsiya, 2022. Vysokoselektivnyy mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr [Patent RF, No. 2775868 C1, 2022. Highly selective microstrip band-pass filter].
6. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Khodenkov S.A.* Patent № 2797166 C1. Ros. Federatsiya, 2023. Mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr [Patent RF, No. 2797166 C1, 2023. Microstrip band-pass filter].
7. Patent US5066933. Band-pass filter. Publication Date 19.11.1991.
8. Patent US20020057143. High frequency filter, filter device, and electronic apparatus incorporating the same. Publication Date 16.05.2002.
9. *Xiao F., Norgren M.* Compact third-order microstrip bandpass filter using hybrid resonators, *Clinics in colon and rectal surgery*. Thieme Medical Publishers, 2011, Vol. 19, pp. 93-106.
10. *Agafonov V.M., Labyntsev V.A., Labyntsev A.V.* Mikropoloskovyy grebenchatyy fil'tr. A.S. SSSR №1262602. Opubl. V BI, 1986, № 37 [Microstrip comb filter. USSR No.1262602. Publ. In BI, 1986, No. 37].
11. *Labyntsev A.V., Ignat'ev V.V., Vasil'ev V.V., Mikhaylovskiy Vit. A., Kharlanov D.V.* Pro-ektirovanie fil'tra iz shpilechnykh rezonatorov s metallizirovannymi otverstiyami s pomoshch'yu programmnoy sistemy [Software system for designing a filter made of hairpin resonators with metallized holes], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2023, Vol. 36, No. 4, pp. 668-677. DOI: 10.15827/0236-235X.142.668-677. Available at: <http://www.swsys.ru/archive/2023-4.pdf>.
12. *Obukhovets V.A., Labyntsev A.V., Kharlanov D.V., Ponomarev N.E., Sarzhanov A.N.* Example of Filter Synthesis on Two Anti-directional Stud Resonators with One Metalized Hole in Each Resonator, 2023 *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023, pp. 160-163. DOI: 10.1109/rsemw 58451.2023.10202019.
13. *Agafonov V.M., Labyntsev A.V.* Sintez mikropoloskovykh grebenchatykh fil'trov [Synthesis of microstrip comb filters], *Izvestiya Vuzov SSSR. Radioelektronika* [Izvestiya of Universities of the USSR, Radioelectronics], 1987, No. 2, pp. 95. The manuscript was deposited in VINITI on 08/29/86. No.6286-In 86.
14. *Agafonov V.M., Labyntsev A.V.* Sintez mikropoloskovykh fil'trov zadannoy struktury [Synthesis of microstrip filters of a given structure. – In the collection: Abstracts of reports], *Vsesoyuznaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Problemy matematicheskogo modelirovaniya i realizatsii radioelektronnykh sistem SVCh na ob'emnykh integral'nykh skhemakh: Tezisy dokladov* [All-Union Scientific and Technical Conference "Problems of mathematical modeling and implementation of microwave radioelectronic systems on volumetric integrated circuits: Abstracts of reports]. Moscow, 1987, pp. 73.
15. *Agafonov V.M.* Polinomial'nye fil'try SVCh [Polynomial microwave filters], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 1970, Vol. 15, No. 10, pp. 2191-2193.

16. *Labyntsev A.V.* Passivnye selektivnye ustroystva SVCh na baze mnogomodovykh mikro-poloskovykh liniy: diss. ... kand. tekhn. nauk [Passive selective microwave devices based on multimode microstrip lines: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog: TRTI, 1987, 201 p.
17. *Mattey D.L., Yang L., Dzhons E.M.T.* Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi [Microwave filters, matching circuits and communication circuits]: transl. from engl., ed. by L.V. Alekseeva and F.V. Kushnira. Moscow: Svyaz', 1971, 440 p.
18. *Labyntsev A.V., Poveshenko L.I., Kharlanov D.V.* Two-Stage Design of Microstrip Filters from Arbitrary Configuration Resonators, 2019 *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2019, pp. 172-175. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792770>. DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792770.
19. *Labyntsev A.V., Poveshenko L.I., Kharlanov D.V.* Microstrip Filter with Extended Barrier, 2019 *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2019, pp. 176-179. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792722>. DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792722.
20. Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet antenn i SVCh struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft [Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft]. Moscow: ZAO «NPP „Rodnik“», 2009, 256 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Харланов Дмитрий Валентинович – Южный федеральный университет; e-mail: mitya999@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89620130677; кафедра антенн и радиопередающих устройств; соискатель.

Лабынцев Алексей Викторович – e-mail: labyntsev@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085142003; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Kharlanov Dmitry Valentinovich – Southern Federal University; e-mail: mitya999@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79620130677; the department of antennas and radio transmitting devices; the applicant.

Labyntsev Alexey Viktorovich – e-mail: labyntsev@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: 89085142003; department of theoretical foundations of radio engineering; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-202-220

**А.В. Бугакова, О.В. Дворников, Н.Н. Прокопенко, В.А. Чеховский,
Д.В. Клейменкин**

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ НА GAN И GAAS ТРАНЗИСТОРАХ*

Высокотемпературные интегральные микросхемы (ИМС), сохраняющие работоспособность при температуре более 150°C, требуются во многих областях промышленности, например, в аэрокосмическом, авиационном и автомобильном приборостроении, нефтехимической промышленности, электроэнергетике, электронике военного назначения. В настоящее время зарубежные предприятия серийно выпускают несколько высокотемпературных аналоговых и аналого-цифровых ИМС на основе кремниевых КМОП КНИ структур – ADS1278-НТ, ADS1282-НТ, ADS8320-НТ, INA129-НТ, INA333-НТ, ОРА2333-НТ и др. В Российской Федерации также разработаны высокотемпературные кремниевые операционные усилители и АЦП. Однако максимальная рабочая температура таких изделий не превышает 200°C из-за наличия ограничений кремниевых технологий. По указанной причине в качестве полупроводников, предназначенных для высокотемпературных ИМС, чаще всего рассматриваются широкозонные, такие как карбид кремния (SiC), нитрид (GaN) и арсенид галлия (GaAs), которые обеспечивают ряд характеристик, необходимых для высокотемпературных применений: широкую запрещенную зону, высокую скорость насыщения носителей заряда и низкую концентрацию собственных носителей заряда. В статье

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>.