

УДК 621.372.54

DOI 10.33286/2075-8693-2019-43-70-78

© А. Л. Ворожцов, А. А. Иванов, И. М. Петренко

Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА L-ДИАПАЗОНА ПО ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ

Освещен опыт создания миниатюрного полосового фильтра L-диапазона с габаритами 1,56×3,7×0,1 мм, изготовленного по технологии интегрированных пассивных устройств Integrated Passive Devices с использованием Process Design Kit отечественного предприятия. Показаны этапы разработки фильтра, схемная оптимизация и электромагнитное моделирование в САПР. Приведены данные измерений опытных образцов фильтра в сравнении с результатами моделирования.

Ключевые слова: технология Integrated Passive Devices, полосовой фильтр L-диапазона, Process Design Kit.

Для цитирования: Ворожцов А. Л., Иванов А. А., Петренко И. М. Разработка миниатюрного полосового фильтра L-диапазона по технологии интегрированных пассивных устройств // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 4 (43). С. 70–78. DOI 10.33286/2075-8693-2019-43-70-78.

© А. Л. Vorozhtsov, А. А. Ivanov, I. M. Petrenko

Central design Bureau of automation, Omsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF MINIATURE BANDPASS FILTER L-BAND FROM INTEGRATED PASSIVE DEVICES TECHNOLOGY

The article presents the experience of creating a miniature bandpass filter L-band, dimensions 1,56×3,7×0,1 mm., manufactured on the technology of integrated passive devices Integrated Passive Devices using Process Design Kit domestic enterprise. The stages of filter development, optimization of its scheme and electromagnetic modeling in CAD are shown. Data of measurements of experimental samples of the filter in comparison with results of its modeling are given.

Keywords: Integrated Passive Devices technology, bandpass filter L-band, Process Design Kit.

For citation: Vorozhtsov A. L., Ivanov A. A., Petrenko I. M. Development of miniature bandpass filter L-band from integrated passive devices technology // Radio communication technology. 2019. Iss. 4 (43), pp. 70–78. DOI 10.33286/2075-8693-2019-43-70-78.

Введение

Одной из тенденций развития мобильных беспроводных систем связи является рост рабочей частоты при уменьшении габаритов устройств. Это побуждает искать новые решения, в том числе и в реализации пассивной части радио-

трактов, в первую очередь устройств частотной селекции (фильтров).

Полосовые фильтры (ПФ) L-диапазона (1–2 ГГц) реализуются, как правило, на элементах с сосредоточенными параметрами. Ранее это были только дискретные компоненты для поверхностного монтажа SMD (Surface Mounted Device), но развитие интегральных технологий сделало возможным появление новых конструкций элементов с большим потенциалом к уменьшению массогабаритных характеристик фильтра. Несмотря на высокий уровень, достигнутый технологией печатного монтажа и обеспечивший широкое применение самых миниатюрных SMD-компонент вида EIA 01005 (400×200 мкм), в том числе и на отечественных предприятиях [1], дискретные элементы пока не могут лидировать в миниатюризации устройств частотной селекции.

В сравнении с конструкцией ПФ на SMD-компонентах, ПФ в интегральном исполнении с помощью таких многослойных технологий, как LTCC, или HTCC (Low/High Temperature Co-fired Ceramics), с минимальным размером элемента 100×100 мкм прекрасно себя зарекомендовали. Данная технология дает уменьшение габаритов LTCC-фильтров в несколько раз. Но, как и для любого интегрального устройства, возможности по корректировке параметров LTCC-фильтра крайне ограничены после изготовления. Это замедляет процесс разработки, так как требует изготовления нескольких итераций топологии фильтра или приводит к дополнительному усложнению его конструкции и размещению на поверхности многослойного LTCC-модуля некоторых подстроечных элементов [2].

Интегральное тонкопленочное МДМ (металл – диэлектрик – металл) исполнение ПФ на квазисосредоточенных элементах с минимальным топологическим размером 10×10 мкм наиболее перспективно для миниатюризации, но полностью лишено какой-либо возможности подстройки элементов фильтра после его изготовления. Прецизионные возможности тонкопленочной технологии и вычислительные мощности, доступные современным САПР с электромагнитным (ЭМ) анализом, позволяют успешно проектировать простые конструкции фильтров с небольшим количеством элементов [3]. В то же время усложнение конструкции, сопряженное с увеличением количества и разнообразия интегральных элементов ПФ, а значит, и нелинейным ростом технологических отклонений каждой их совокупности, аналогично приводит к нескольким итерациям для отработки конструкции фильтра. Цена итерации в тонкопленочной технологии с учетом изготовления корректирующего комплекта фотошаблонов и другого значительно превышает затраты для толстопленочных решений типа LTCC, поэтому до 2000-х годов тонкопленочная технология в реализации ПФ на квазисосредоточенных элементах была не востребована.

Однако произошедшая в 1990-х годах в зарубежной электронной промышленности смена организационной модели в виде отказа от IDM (Integrated Device Manufacture – «комплексный производитель») и развитие концепции fables/foundry (дизайн-центр/фабрика) привели к стандартизации технологических процессов на фабриках и появлению в арсенале разработчиков в дизайн-центрах нового инструмента – PDK (Process Design Kit) [4]. Он включает в себя набор правил проектирования и библиотеку элементов, интегрированную в САПР. Параметры элементов в PDK строго заданы и обеспечиваются стандартизированным технологическим процессом. Таким образом, проведенная предварительно отработка элементов на этапах стандартизации технологического процесса и далее, при верификации PDK, обеспечивает в будущих разработках

очень хорошее совпадение результатов проектирования и изготовления [5].

Наглядным примером может служить технология интегрированных пассивных устройств IPD (Integrated Passive Device), возникшая в полупроводниковом производстве интегральных схем и реализующая фильтры, устройства согласования и симметрирования (BALUN's), направленные ответвители и делители мощности и показывающая сегодня наибольшие успехи в миниатюризации большинства пассивных устройств, в том числе фильтров [6].

Цель работы – реализация миниатюрного ПФ L-диапазона (1–2 ГГц) с малыми габаритами 1,56×3,7×0,1 мм путем использования PDK. Фильтр выполнен по технологии IPD на российском предприятии.

Постановка задачи

Ранее, в [7], нами была показана целесообразность применения технологии IPD в реализации полосового фильтра L-диапазона на квазисосредоточенных элементах для его максимальной миниатюризации. Современный рынок foundry-услуг по изготовлению IPD-устройств представляют несколько крупных фабрик: Win Semiconductors (Тайвань), OMMIC (Франция), АО «Светлана-Рост» (Россия) и другие. Каждое предприятие имеет свою линейку PDK для разных техпроцессов и технологий. Как правило, зарубежные фабрики обладают более передовыми технологическими процессами, но нестабильный курс рубля, необходимость импортозамещения и существенно меньшие финансовые затраты размещения заказа в России остановили наш выбор на АО «Светлана-Рост» с PDK на базе стандартного технологического процесса изготовления GaAs микросхем по технологии рHEMT 0,5 мкм. Исходные данные для проектирования ПФ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры полосового фильтра

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	Центральная частота полосы пропускания, ГГц	1,5
2	Вносимые потери на центральной частоте, дБ	3,5, не более
3	Нижняя граница полосы пропускания f_n , ГГц	1
4	Верхняя граница полосы пропускания f_v , ГГц	2
5	Внеполосное подавление, дБ	40, не менее
6	Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)	2, не более

Проектирование

Расчет фильтров начинается с выбора схемы. Для автоматизации синтеза схем применялся модуль iFilter (рис. 1), входящий в состав САПР NI AWR Design Environment v13 (AWR DE). Синтез фильтров базировался на известном методе использования фильтров – прототипов нижних частот. Для получения заданных характеристик в модуле iFilter были синтезированы несколько вариантов схем.

Синтезированные схемы редко удовлетворяют сразу всем предъявляемым требованиям, но, используя встроенную функцию оптимизации Optimizer Goals программного комплекса AWR DE, можно задать параметры граничных условий функций для оптимизации (рис. 2).



Рис. 1. Вид окна программы, показывающей результаты синтеза iFilter AWR DE

Так для схемы ПФ критериями оптимизации стали коэффициент передачи (S_{21}), границы полосы пропускания и КСВН (VSWR). Оптимизация в AWR DE проходит в автоматическом режиме путём перебора значений параметров элементов схемы в заданных пределах, что значительно упрощает процесс проектирования устройств. Корректировка параметров происходит итерационным путём, используя различные алгоритмы оптимизации и при необходимости возвращаясь на предыдущие этапы проектирования, последовательность которых может изменяться в зависимости от опыта разработчика. Маршрут разработки настоящего фильтра, включая блок-схему процесса проектирования, был представлен немногим ранее на конференции [8].

После оптимизации производилась замена «виртуальных» элементов схемы на «реальные» из библиотеки стандартных элементов PDK. Материал подложки в PDK_rHEMT05_v.0.0.2.2 – арсенид галлия GaAs ($\epsilon = 12,9$, $\text{tg}\sigma = 0,001$), а пассивные компоненты представлены моделями диодов, конденсаторов (МДМ и встречно-штыревых), резисторов, индуктивностей (круглых, квадратных, масштабируемых), контактных площадок, микрополосковых линий и других элементов. Все модели в PDK_rHEMT05_v.0.0.2.2 верифицированы в частотном диапазоне от 0 до 20 ГГц.

Для улучшения внеполосного подавления и согласования фильтра в схему было добавлено по одному МДМ-конденсатору малой емкости на входы фильтра. Финальная схема ПФ составила 11 конденсаторов и 9 катушек индуктивностей. Конструирование топологии схемы производилось в соответствии с правилами топологического проектирования PDK с учетом взаимного электромагнитного влияния элементов и требования по минимизации габаритных размеров.

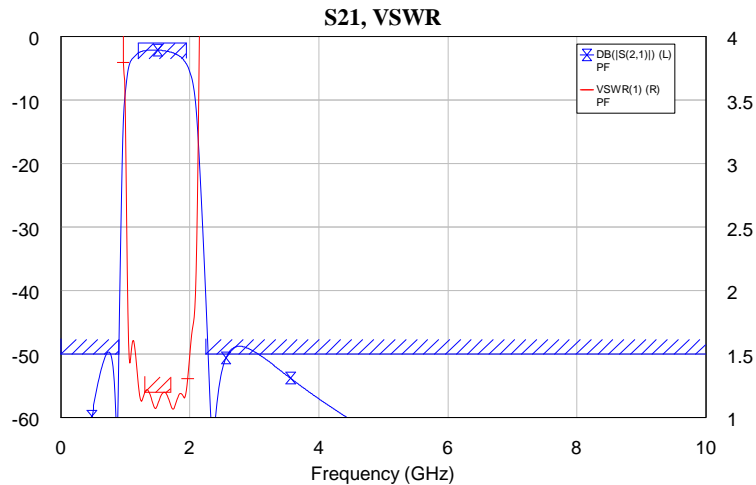


Рис. 2. График АЧХ с полями допуска по оптимизации схемы ПФ

На рис. 3 и 4 показаны топология и 3D-модель разрабатываемого ПФ с библиотечными элементами PDK.

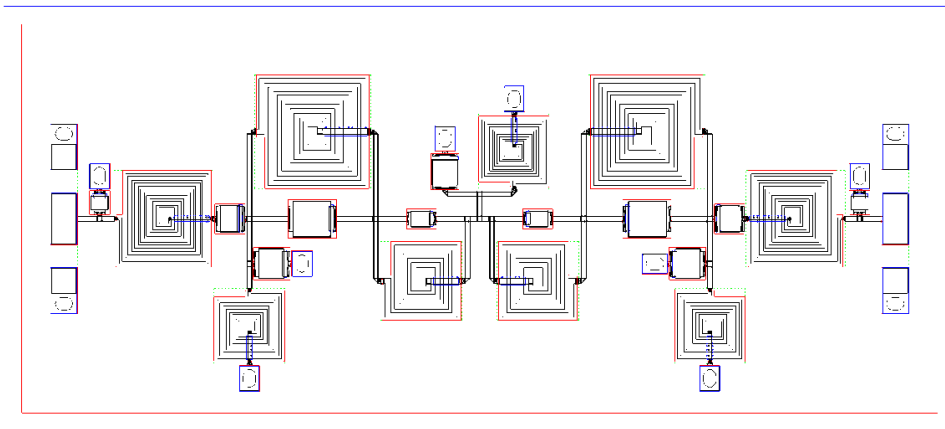


Рис. 3. Топология фильтра

Анализ схемы полосового фильтра из элементов PDK показал, что параметры схемы изменились и теперь не удовлетворяют техническим требованиям. На искажение характеристик повлияло внесение в схему дополнительных топологических элементов: микрополосковых линий между катушками и конденсаторами, переходных отверстий, контактных площадок, которые внесли в схему свои собственные паразитные индуктивности и емкости. Для улучшения характеристик и компенсации паразитных эффектов схема ПФ была повторно оптимизирована.

Наиболее достоверные значения получаются при 3D ЭМ-анализе схемы ПФ с учетом физического объема конструкции фильтра в пространстве. Синтез в AWR DE 3D ЭМ структур элементов схемы ПФ и построение общей физической ЭМ-модели фильтра занимает большую часть временных затрат на проектирование. Для ускорения был применён 2,5D ЭМ-симулятор AXIEM из состава AWR DE, хорошо себя зарекомендовавший для пленочных структур.

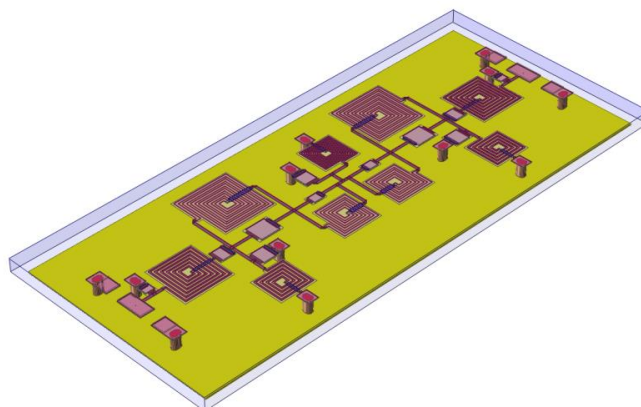


Рис. 4. 3D-вид разработанного фильтра

Данные ЭМ-расчета фильтра показали приемлемый результат и после небольшой коррекции номиналов элементов схемы проект ПФ полностью соответствовал требованиям. После генерации файла топологии слоев в формате DXF проект был передан на отечественную фабрику АО «Светлана-Рост» для изготовления. Габаритные размеры разработанного ПФ L-диапазона по технологии IPD составили $3700 \times 1560 \times 100$ мкм.

Результаты

На рис. 5 изображен изготовленный IPD-кристалл ПФ L-диапазона на фоне линейки с делениями 1 мм для наглядной оценки габаритов. Результаты измерения IPD кристаллов ПФ и данные расчета электромагнитного моделирования приведены на рис. 6 и 7. Полученные характеристики в диапазоне частот до 20 ГГц подтвердили достоверность результатов ЭМ-расчета схемы ПФ на базе элементов PDK.

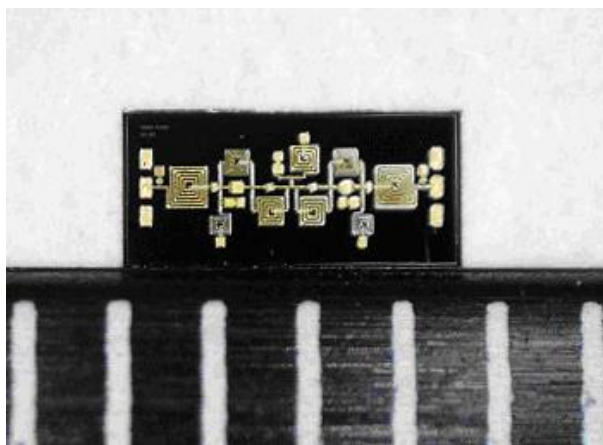


Рис. 5. Внешний вид изготовленного ПФ (цена деления – 1 мм)

Статистические данные обработки 200 штук годных IPD-кристаллов фильтров в нормальных условиях (н. у.) приведены в табл. 2. Полученные данные для такой большой выборки показали очень хорошее совпадение результатов моделирования и измерений изготовленных ПФ, а также повторяемость характеристик IPD-фильтров между образцами.

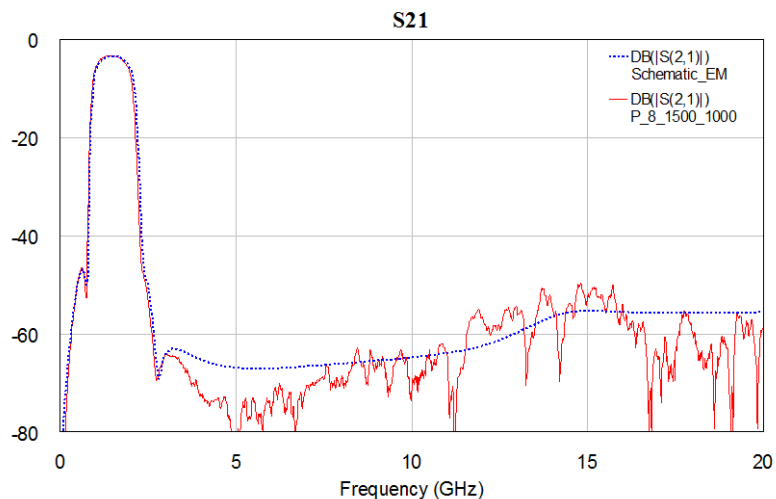


Рис. 6. График, отражающий АЧХ ПФ
(пунктир – модель; сплошная – образец)

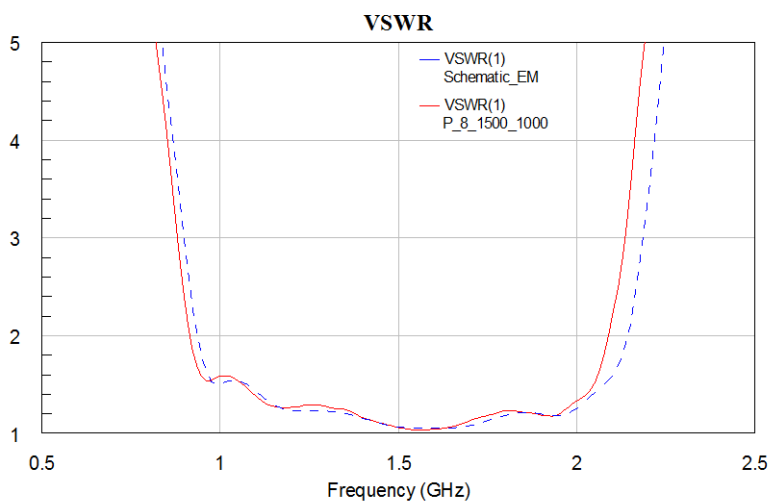


Рис. 7. График, отражающий КСВН в полосе пропускания ПФ
(штриховая – модель; сплошная – образец)

Таблица 2

Результаты измерений изготовленных фильтров ИРД в н. у.

Наименование параметра	Модель	Статистические данные образцов		
		МИН	МО	МАКС
Вносимые потери на центральной частоте, дБ	$\leq 3,5$	3,13	3,38	3,6
Границы полосы пропускания, ГГц:	fн	1	1,018	1,03
	fв	2	1,99	2,034
Полоса пропускания, ГГц	1,0	0,98	1,015	1,04

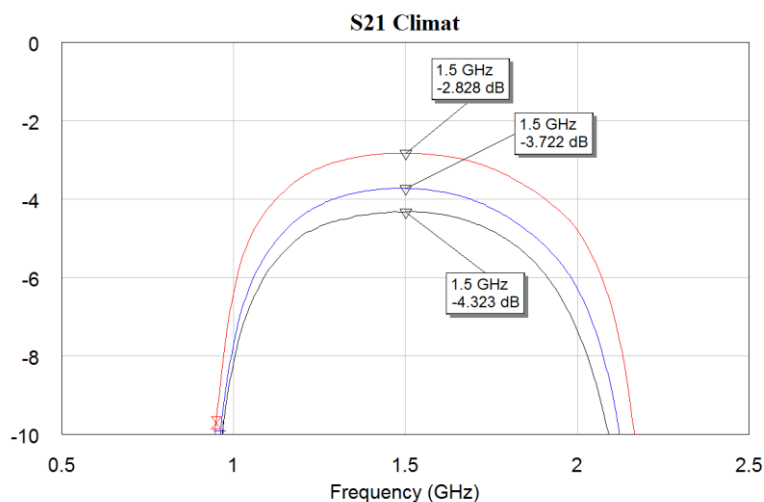


Рис. 8. График, отражающий АЧХ ПФ в диапазоне температур (верхняя кривая: S21 при минус 60 °С; средняя кривая: S21 при плюс 25 °С; нижняя кривая: S21 при плюс 100 °С)

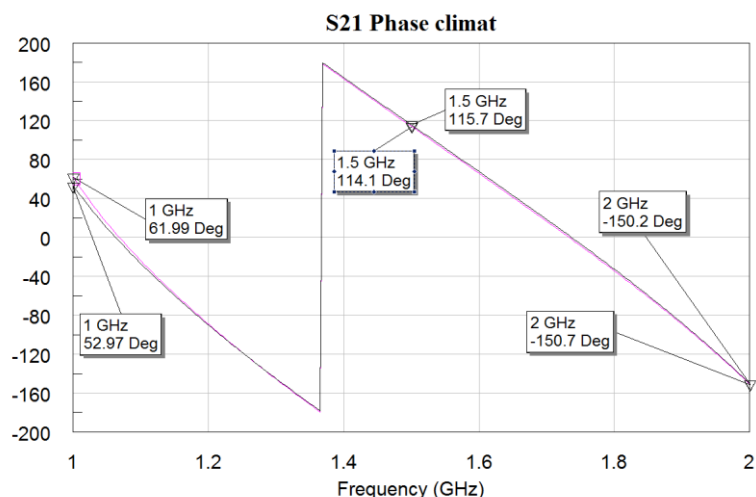


Рис. 9. График, отражающий ФЧХ ПФ в диапазоне температур (верхняя кривая: фаза S21 при минус 60 °С, нижняя кривая: фаза S21 при плюс 100 °С)

Климатические испытания ИРД-кристаллов ПФ проводились в диапазоне от минус 60 до плюс 100 °С. Измерения S-параметров ПФ фиксировались на векторном анализаторе цепей Р4М-18/1 в температурных точках минус 60 °С, плюс 25 °С, плюс 85 °С и плюс 100 °С. Отклонения коэффициента передачи ПФ составили не более минус 1 дБ на холоде и не более 0,7 дБ в тепле относительно измеренного при плюс 25 °С. Изменение фазочастотной характеристики ПФ составило не более 2 градусов в опорной точке (на центральной частоте фильтра) и не более 5 градусов на границах полосы пропускания во всем температурном диапазоне (рис. 8 и 9). Отклонения центральной частоты и границ полосы пропускания на климате составляют не более 50 МГц от измеренного при плюс 25 °С.

Заключение

Разработанный по технологии IPD ПФ L-диапазона показал очень хорошее совпадение результатов моделирования и измерений полученных образцов в широком диапазоне температур. Достигнутые габариты $1,56 \times 3,7 \times 0,1$ мм, особенно его низкий профиль в 100 мкм, значительно повышают эффективность применения таких IPD-фильтров в решениях объёмной интеграции, например 3D-SiP (System in Package – «система в корпусе») [9].

Настоящая работа – успешный пример полностью отечественной реализации концепции fables/foundry, являющейся в сегодня общепринятой мировой практикой разработки и создания новых решений и устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мейлицев В.* Малые серии и массовый продукт в одном производстве. Визит в АО «ПО «Электронприбор» // Вектор высоких технологий. 2018. № 5 (40). С. 28–38. URL: https://ostec-group.ru/upload/iblock/637/vvt5-40_.pdf.
2. Полосовые фильтры дециметрового диапазона частот на квазисосредоточенных LC-элементах в LTCC исполнении / И. М. Петренко [и др.] // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2018) : матер. VII Всерос. науч.-техн. конф. (Омск, 17–18 апреля 2018 г.). Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 206–215.
3. *Борейко Д. А., Тюменцев А. И., Солодовникова О. И.*, Разработка интегральных LC-фильтров нижних частот на основе тонкопленочной технологии // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 2 (41). С. 87–92.
4. Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности / А. В. Зверев [и др.] // Электроника НТБ. 2011. № 4. С. 107–109.
5. Практика разработки и верификации инструментов проектирования (PDK) СВЧ МИС / И. С. Пушница [и др.] // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем : матер. VII Всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2018. С. 216–227.
6. *Kai Liu, Robert C. Frye, Roger Emigh.* Miniaturized Ultra-Wideband band-pass-filter from silicon integrated passive device technology // Microwave Symposium Digest. 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5165882>.
7. *Иванов А. А., Петренко И. М.*, Миниатюризация широкополосных трактов промежуточной частоты // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2010) : матер. III Всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2010. С. 91–97.
8. *Ворожцов А. Л., Иванов А. А., Петренко И. М.* Опыт применения отечественной технологии IPD в реализации полосового фильтра L-диапазона частот // Радиотехника, электроника и связь : сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2019. С. 367–374.
9. *Васильев А.* Современные технологии 3D интеграции // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 156–158.

Сведения об авторах

Иванов Алексей Анатольевич, сотрудник АО «ЦКБА». E-mail: microelectronics@ckba.net.

Петренко Игорь Михайлович, сотрудник АО «ЦКБА». E-mail: imp_ckba@mail.ru.

Ворожцов Александр Леонидович, сотрудник АО «ЦКБА». E-mail: alek.vorog@yandex.ru.

Поступила в редакцию: сентябрь 2019 г.

Рецензирование: октябрь 2019 г.

Принята в печать: ноябрь 2019 г.