

## Пассивные полосовые фильтры для современных систем связи СВЧ-диапазона

А.С. Койгеров<sup>1</sup> , П.А. Туральчук<sup>1</sup> , М.М. Деркач<sup>2</sup>, С.С. Андрейчев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
197376, Россия, г. Санкт-Петербург,

ул. Профессора Попова, 5

<sup>2</sup> АО «НПП «Радар ммс»

197375, Россия, г. Санкт-Петербург,

ул. Новосельковская, 37

<sup>3</sup> ООО «СВЧ решения»

198095, Россия, г. Санкт-Петербург,

ул. Промышленная, 19, лит. Н

**Аннотация – Обоснование.** Полосовые фильтры являются неотъемлемой составной частью любых радиотехнических систем и современных систем связи. Исследование и разработка новых пассивных компонентов обусловлены возрастающей потребностью в таких элементах для модернизации и создания новых современных систем связи. **Цель.** Представить краткий обзор пассивных полосовых фильтров и привести их классификацию по типу реализации. **Методы.** Рассмотрены результаты экспериментальных исследований и разработок различных типов полосовых фильтров. **Результаты.** Рассмотрены фильтры на сосредоточенных элементах, микрополосковые фильтры, фильтры на основе высокотемпературных сверхпроводников, фильтры в виде многослойных интегральных схем, фильтры на объемных металлических резонаторах, фильтры на диэлектрических резонаторах, фильтры на поверхностных и объемных акустических волнах. На качественном уровне проанализированы их основные достоинства и недостатки с точки зрения электрических характеристик и массогабаритных показателей. Приведены примеры топологической и конструктивной реализации. **Заключение.** Рассмотренные в работе пассивные полосовые фильтры позволяют реализовать устройства частотной селекции на рабочих частотах до 6 ГГц и выше с учетом современных системных тенденций и требований к устройствам такого типа.

**Ключевые слова** – полосовые фильтры; фильтры на ПАВ; фильтры на ОАВ; фильтры на диэлектрических резонаторах; микрополосковые фильтры; фильтры на ВТСП; фильтры на объемных резонаторах; ЛТСС-фильтры.

### Введение

Полосовые фильтры (ПФ) являются неотъемлемой составной частью любых радиотехнических систем и современных систем связи [1; 2]. Исследование и разработка новых пассивных компонентов обусловлена возрастающей потребностью в таких элементах для модернизации и создания новых современных систем связи. При этом с возрастанием сложности систем связи требования к электрическим и массогабаритным параметрам устройств постоянно ужесточаются. Современные СВЧ-устройства: радиопередатчики, приемники, системы передачи информации на радиочастоте – постоянно развиваются, появляется все больше новых беспроводных сервисов и протоколов обмена данными, поэтому возникает потребность в различных полосах пропускания и несущих частотах. Кроме того, необходимо обеспечивать высокую избирательность системы по частоте, чтобы не создавать помех другим системам, использующим соседний частотный диапазон. С ростом объема и скорости передаваемой информации необходи-

мо обеспечивать во многих задачах расширение относительной полосы пропускания. При этом происходит «уплотнение» частотного спектра в радиоканале, появляется потребность в крутых склонах амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Таким образом, развитие радиоэлектронных систем передачи, обработки и приема информации нового поколения ставит все более возрастающие требования к достижению предельных технических характеристик. В зависимости от диапазона рабочих частот, требований по АЧХ и массогабаритных показателей применяются совершенно разные подходы к принципам построения ПФ, что связано с большим разнообразием физических реализаций.

Широкое применение фильтров в технике СВЧ привело к большому многообразию их схем и конструкций. В зависимости от топологического или конструктивного исполнения, а также используемых элементов фильтры можно разделить на несколько групп. В большинстве своем в конструкциях пассивных аналоговых фильтров используют

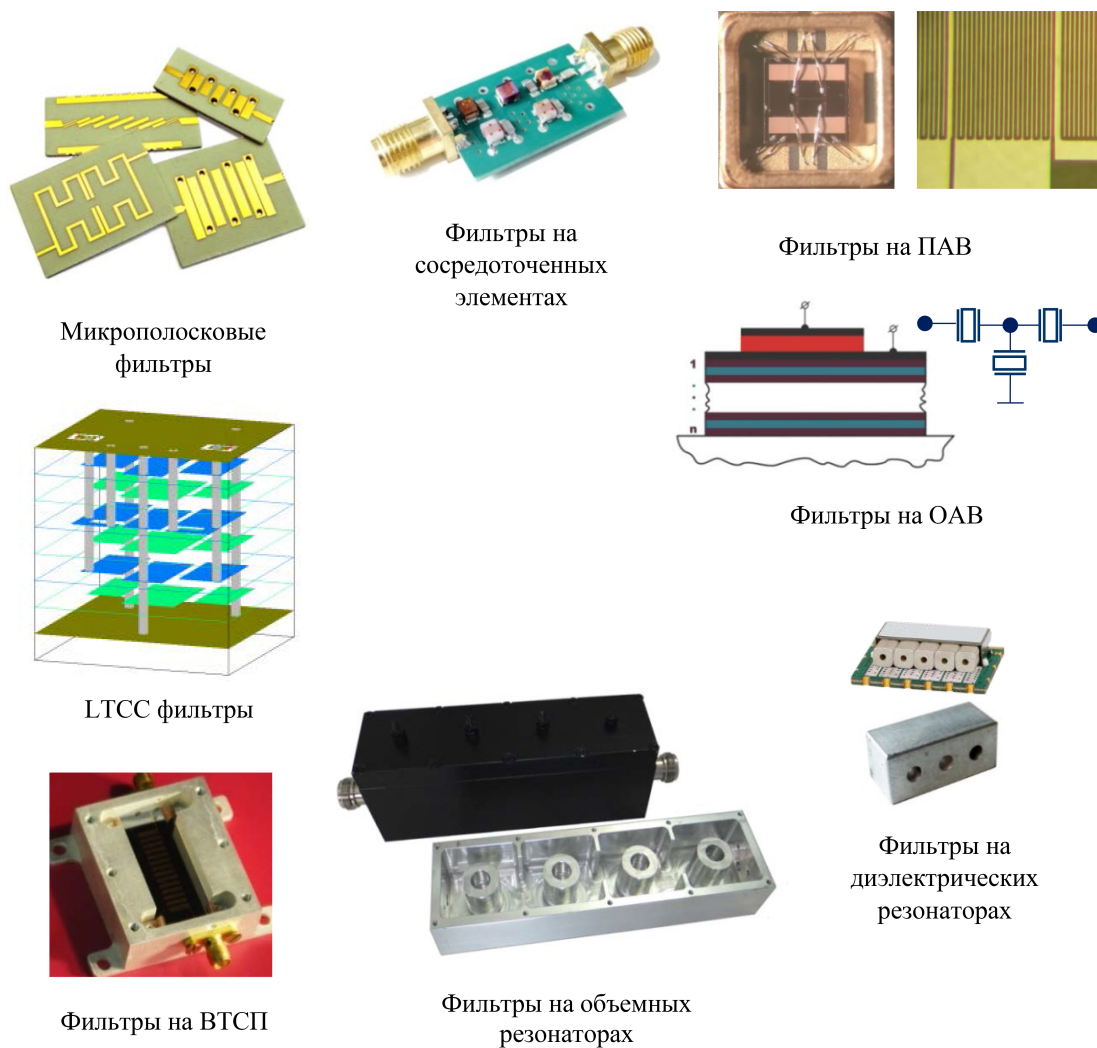


Рис. 1. Классификация пассивных полосовых фильтров  
Fig. 1. Classification of passive bandpass filters

сосредоточенные или распределенные реактивные элементы, такие как катушки индуктивности и конденсаторы. Данные пассивные элементы образуют некоторые резонаторные структуры, которые могут быть реализованы либо в виде плосковом (печатном), либо объемном исполнении. Параметры резонаторов зависят от частоты сигнала, поэтому, комбинируя их, можно добиться нужной формы частотной характеристики. Таким образом формируются некоторые классы резонаторных структур в составе фильтров по исполнению. Другой принцип построения пассивных аналоговых фильтров – это использование механических (акустических) колебаний в резонаторе той или иной конструкции. В диапазоне 0,5...3 ГГц широкое распространение имеют пьезоэлектрические фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [3], на частотах до 10 ГГц актуальны ПФ на объемных акустических волнах (ОАВ) [3]. Наиболее популярные типы пассивных ПФ, при-

меняемые в современных системах связи, представлены на рис. 1, диапазон частот применения – рис. 2.

В данной статье пойдет речь о пассивных полосовых непереключаемых фильтрах. Хотя стоит отметить, что в современных системах связи используются не только пассивные фильтры, но и активные фильтры и фильтры с электронной перестройкой частоты. Среди них можно выделить фильтры на варикапах [4] и фильтры на ферритовых резонаторах на железо-итриево-гранате (ЖИГ-перестройка), на основе которых производят СВЧ-фильтры на сферах ЖИГ [5] и фильтры на магнитостатических волнах [6], которые различаются как конструкцией, так и принципом работы. Кроме того, существуют фильтры с управляемыми сегнетоэлектрическими конденсаторами [7].

Перед разработчиками современных систем связи практически всегда стоит задача выбора

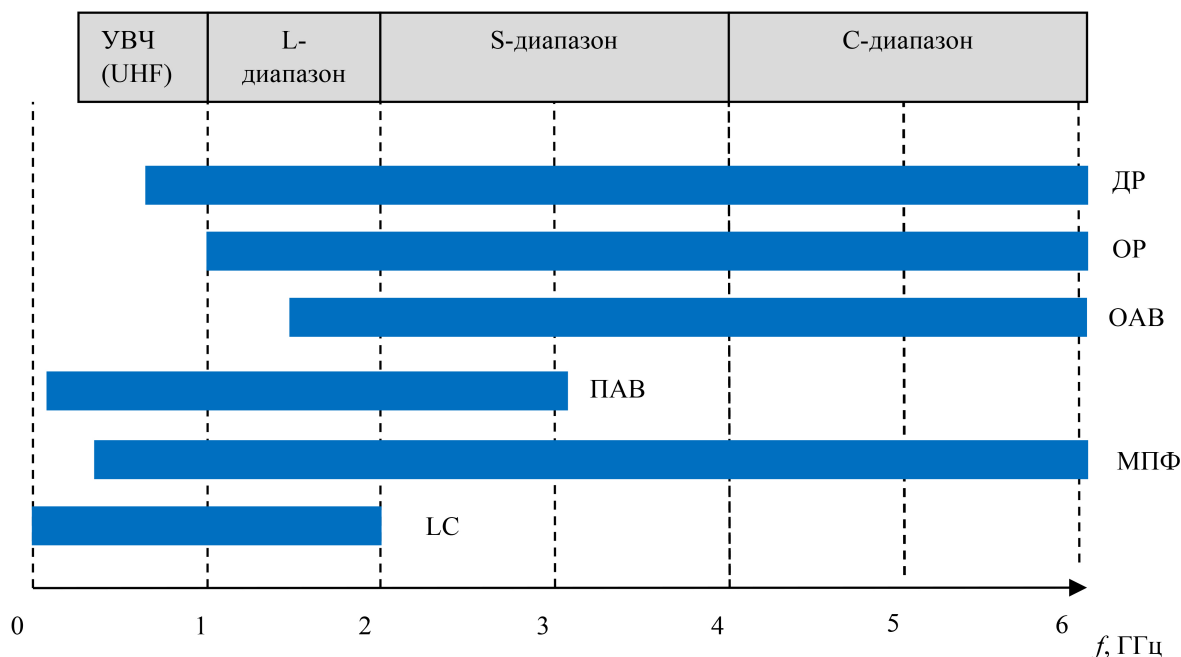


Рис. 2. Диапазон рабочих частот полосовых фильтров  
 Fig. 2. Operating frequency range of bandpass filters

типа (конструкции) ПФ, обеспечивающего требуемые частотные характеристики (минимально возможные потери и хорошая избирательность) устройства при минимально возможных габаритах фильтра с учетом технологичности изготовления (сложность изготовления и последующей настройки).

Цель работы – показать современное состояние и отличительные признаки основных полосовых пассивных фильтров, которые имеют малые потери и хорошую избирательность в диапазоне СВЧ.

### 1. Фильтры на сосредоточенных элементах

Индуктивно-емкостные фильтры, в том числе и фильтры на SMD-элементах (surface mounted devices) [8], обычно используются для диапазона низких частот до 2 ГГц и имеют, как правило, невысокую стоимость. Небольшие размеры позволяют его использовать в портативных устройствах, например мобильных телефонах. Они часто применяются как согласующее звено с активными компонентами, например усилителями, или в блоках питания для подавления паразитных гармоник. Основным недостатком этих фильтров – высокие внутренние потери, которые минимизируются за счет тщательного подбора величин индуктивности и емкости. Катушки индуктивности и конденсаторы на печатных платах, как правило, не предназначены для высоких напряжений и очень

чувствительны к его перепадам и тем более не используются в системах с большой мощностью.

### 2. Фильтры с распределенными параметрами

На сверхвысоких частотах сосредоточенные элементы (конденсаторы и катушки индуктивности) практически не используются, так как с ростом частоты их типичные для этого диапазона номиналы, а следовательно, и габариты, уменьшаются настолько, что изготовление их становится невозможным. Поэтому применяются так называемые линии с распределенными параметрами, в которых индуктивность, емкость и активная нагрузка равномерно или неравномерно распределены по всей линии. Конструкции СВЧ-фильтров весьма разнообразны, и выбор конкретной реализации зависит от предъявляемых к устройству требований (значение рабочих частот, добротность, максимальное затухание в полосе задержания, расположение паразитных полос пропускания).

Проектирование фильтров на распределенных параметрах является достаточно сложным процессом, состоящим из двух этапов: получение электрических параметров, исходя из требований к устройству; получение габаритных параметров из полученных электрических. В основе современных методов проектирования микроволновых фильтров лежит теория связанных резонаторов.

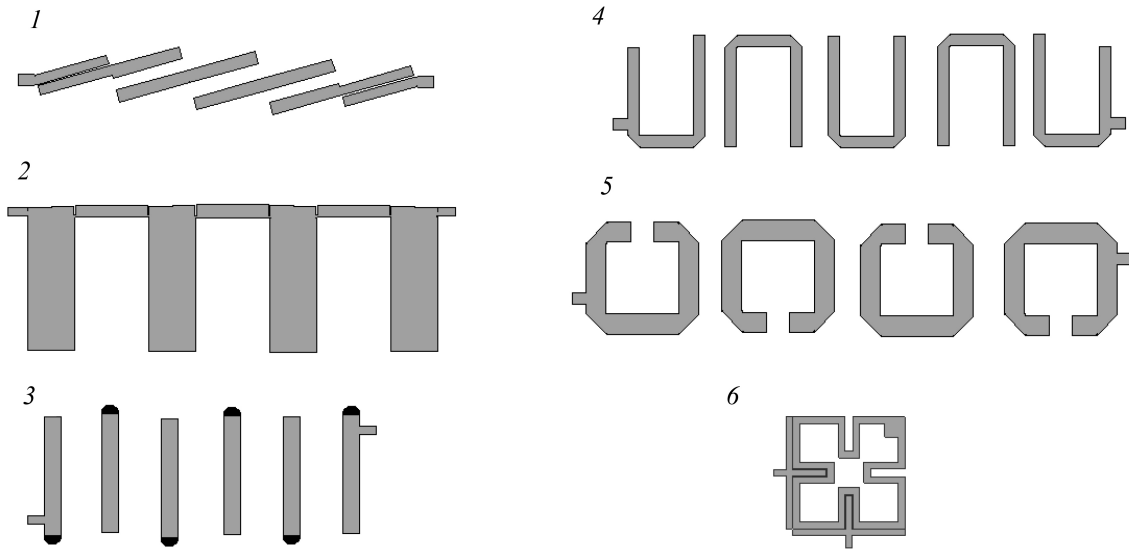


Рис. 3. Основные типы МПФ: 1 – фильтр с разомкнутыми параллельно связанными полуволновыми резонаторами; 2 – фильтр на соединенных резонаторах, не закороченных на «землю»; 3 – фильтр на четвертьволновых встречных полосках, закороченных на одном конце; 4 – фильтр на полуволнах подковообразных (шпильчных) резонаторах; 5 – фильтр на кольцевых резонаторах; 6 – фильтр кольцевого типа

Fig. 3. Basic types of microstrip filters: 1 – filter with open parallel coupled half-wavelength resonators; 2 – filter on coupled resonators not shorted to ground; 3 – filter on quarter-wavelength counter stripes shorted at one end; 4 – hairpin-line microstrip filter; 5 – filter on ring resonators; 6 – ring type filter

## 2.1. Полосковые или микроволновые фильтры

В основе микрополосковых фильтров (МПФ) используются полосковые (печатные) и резонаторы, которые, как правило, представляет собой отрезки полосковых линий передачи длиной  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  [1; 9; 10]. Данные полоски могут быть либо разомкнутыми, либо короткозамкнутыми на концах. Полоски могут быть согнутыми в виде квадрата или шпильки (англ. hairpin). Короткозамкнутый резонатор обладает более высокой добротностью и значительно меньшим концевым излучением по сравнению с разомкнутым резонатором, что приводит к заведомо меньшим вносимым потерям фильтра. Наиболее серьезным недостатком короткозамкнутых резонаторов является необходимость замыкания проводника на основании с помощью вышеописанных элементов заземления, что усложняет технологический процесс изготовления. Основные типы МПФ представлены на рис. 3. Примеры реализации МПФ на различных подложках отражены на рис. 4.

В работе [1] показано, что принципы построения МПФ довольно разнообразны и основаны на формировании дополнительных электромагнитных связей между несмежными резонаторами, на использовании эффекта неравенства фазовых скоростей нормальных волн в системах микрополосковых линий, а также свойств многомодовых резонаторов [1].

Микрополосковые фильтры используются для диапазона частот от 1 ГГц и выше. Важным фактором для этих фильтров является длина волны ( $\lambda$ ), которая, как известно, тем короче, чем выше частота. Таким образом, в нижней части СВЧ-диапазона эти фильтры недостаточно компактны.

В основе МПФ лежит LC-прототип. Проектирование целесообразно начинать с синтеза прототипа фильтра на сосредоточенных элементах. Этот LC-прототип лишь приблизительно соответствует микрополосковой структуре, но, как показала практика, помогает получить хорошее начальное приближение к искомой топологии фильтра. Располагая такими современными пакетами электродинамического моделирования планарных структур, как ADS или AWR (Microwave office), и владея навыками работы в них, можно добиться хорошей сходимости результатов моделирования и эксперимента в части расчета АЧХ и выбора топологии (рисунка печатной платы) МПФ.

### Классификация, варианты исполнения

Все многообразие конструкций можно свести к нескольким типам:

- Традиционные (полуволновые и четвертьволновые);
- На подвешенной подложке [11];
- На пленках высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [12–14];
- Монолитной структуры многослойных интегральных схем на основе керамик с низкой тем-

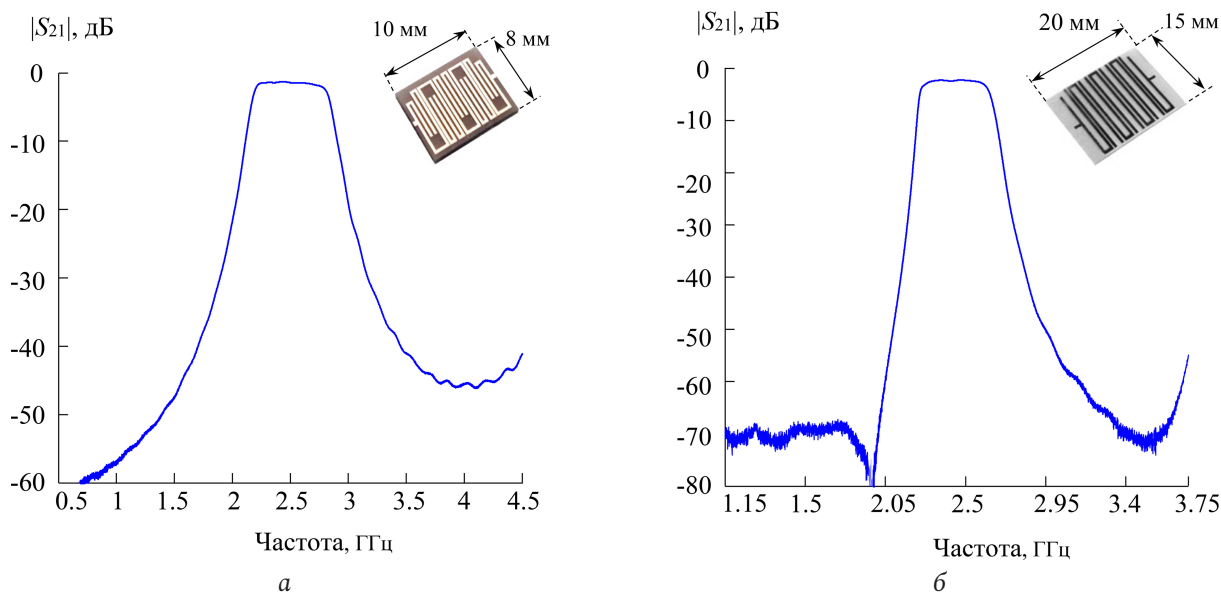


Рис. 4. АЧХ МПФ на различных диэлектрических подложках: а – поликор; б – сапфир  
 Fig. 4. Frequency responses of microstrip filters on different dielectric substrates: a – polycor; b – sapphire

пературой отжига (англ. Low Temperature Cofired Ceramics – LTCC) [15–18].

Общая тенденция на увеличение избирательности микрополосковых фильтров при сохранении минимального вносимого затухания и минимизации габаритов является актуальной задачей.

Известно [1], что повышение частотной избирательности может быть достигнуто путем формирования значительного числа полюсов рабочего затухания на конечных частотах, а уменьшение габаритов – уменьшением числа резонаторов и выполнением их в виде более компактных структур вида: кольцо, меандр, шпилька и т. д. Вследствие этого повышение избирательности МПФ за счет увеличения числа резонаторов больше некоторого значения не имеет смысла, так как это приводит к увеличению потерь в полосе пропускания и габаритов МПФ, а крутизна его частотной характеристики в переходной области не увеличивается.

Избирательность значительно увеличивается, если проводники резонаторов изготовлены из пленок высокотемпературных сверхпроводников, но большая стоимость и необходимость поддержания криогенных температур ограничивает их широкое применение.

Уменьшить размеры фильтров более чем на порядок и существенно повысить их избирательность, вводя перекрестные связи между несоседними резонаторами, позволяет переход к фильтрам на подвешенных подложках [11]. Заметим, что фильтры на подвешенной подложке сложнее в производстве, чем микрополосковые,

однако они могут изготавливаться в виде монолитной структуры технологией многослойных интегральных схем на основе LTCC.

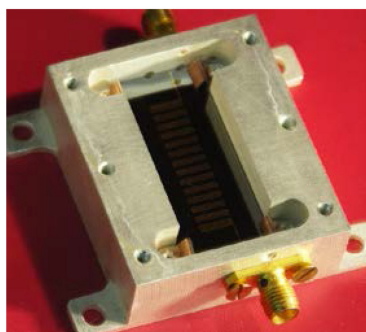
Фильтры на микрополосковых линиях имеют паразитные полосы пропускания на частотах, кратных основной, и также ограничения для использования в нижней области высокочастотного диапазона.

## 2.2. Фильтры на основе высокотемпературных сверхпроводников

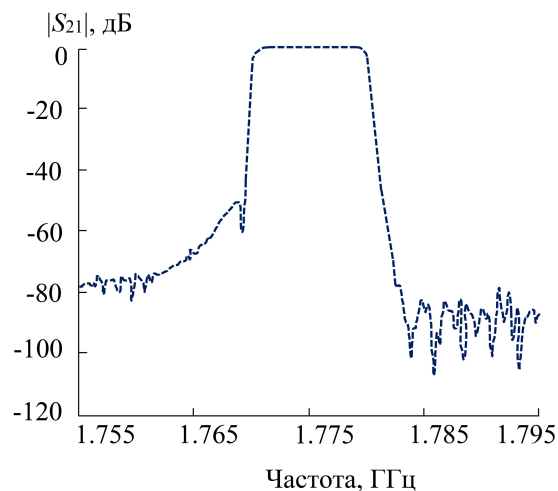
Открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости дало возможность создания высокочастотных резонаторов на их основе. В 1987 г. была открыта сверхпроводимость керамики состава  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO), и впоследствии разработана технология роста эпитаксиальных пленок.

В сверхпроводящем состоянии пленки ВТСП обладают значительно более низким поверхностным сопротивлением, чем пленки обычных металлов (Cu, Ag, Au), при той же температуре, вплоть до частот порядка 100 ГГц. Вследствие этого пассивные СВЧ-устройства на основе ВТСП обладают следующими основными преимуществами перед СВЧ-устройствами, выполненными по традиционной технологии: 1) предельно низким уровнем вносимых потерь; 2) малым коэффициентом собственного шума.

Выполнение печатных проводников СВЧ интегральных схем (ИС) на основе ВТСП позволяет улучшить характеристики пассивных СВЧ-устройств, таких как планарные полосно-



а



б

Рис. 5. Пример реализации ПФ на ВТСП 14-го порядка на S-образных резонаторах (а) и АЧХ фильтра ВТСП 12-го порядка для базовой станции сотовой связи (б)

Fig. 5. Example of 14<sup>th</sup> order filter on HTS (high-temperature superconductor) film on S-shaped resonators (a) and frequency response of 12<sup>th</sup> order HTS filter for cellular base station (b)

пропускающие и полоснозаграждающие СВЧ-фильтры с предельно высокой частотной избирательностью и низкими вносимыми потерями; разделители частотных каналов (мультиплексоры и управляемые банки фильтров). ВТСП – микрополосковые фильтры СВЧ-диапазона, обладающие существенным преимуществом по сравнению с традиционными СВЧ-фильтрами в интегральном исполнении. Так, резонаторы, выполненные на пленках ВТСП, имеют высокую собственную добротность, что позволяет обеспечить вносимые потери 0,2–1 дБ для СВЧ-фильтров с относительной шириной полосы пропускания 5–0,3 % соответственно. На рис. 5 представлен пример реализации ПФ на ВТСП 14-го порядка на S-образных резонаторах и АЧХ ВТСП-фильтра 12-го порядка для базовой станции сотовой связи со следующими параметрами: полоса пропускания – 0,5 %, вносимые потери – 0,5 дБ ( $T = 60$  К), крутизна фронтов – 40 дБ/МГц, габариты фильтра 35 мм × 20 мм [12].

Как правило, в основе фильтров используются резонаторы в планарном исполнении на основе отрезков линий передачи с распределенными параметрами. Принципиальной особенностью при расчете устройств СВЧ на ВТСП является тот факт, что на характеристики резонатора влияют параметры пленки ВТСП, определяющие ее поверхностный импеданс. Температурная зависимость этих параметров определяет зависимость характеристик резонаторов и полосовых фильтров на их основе. Вклад кинетической индуктивности в эффективную диэлектрическую проницаемость

микрополосковой линии, образующей резонатор, определяет зависимость резонансной частоты резонаторов ВТСП от температуры. Предварительное нахождение параметров пленки ВТСП и подложки на основе тестовых структур резонаторов [13] позволяет учесть их при последующем синтезе и проектировании многоэлементных фильтров [14].

Следует учитывать, что поддержание рабочих условий ВТСП требует использования соответствующего криогенного обеспечения. Важным для развития широких практических применений ВТСП явился тот факт, что стоимость, вес и энергопотребление криогенного оборудования, необходимого для охлаждения ВТСП до перехода в сверхпроводящее состояние, в несколько раз меньше, чем в случае классических низкотемпературных сверхпроводников.

Отличительные особенности фильтров на ВТСП:

- уникальные характеристики ПФ на ВТСП;
- миниатюрные размеры ПФ, реализованные в интегральном исполнении;
- специальная технология получения пленок ВТСП;
- использование монокристаллических подложек  $\text{LaAlO}_3$ ,  $\text{MgO}$ , сапфир;
- криогенное обеспечение для поддержания рабочих условий ВТСП.

### 2.3. Фильтры в виде многослойных интегральных схем – ЛТСС

Технология многослойных ИС СВЧ на основе керамики с низкой температурой обжига

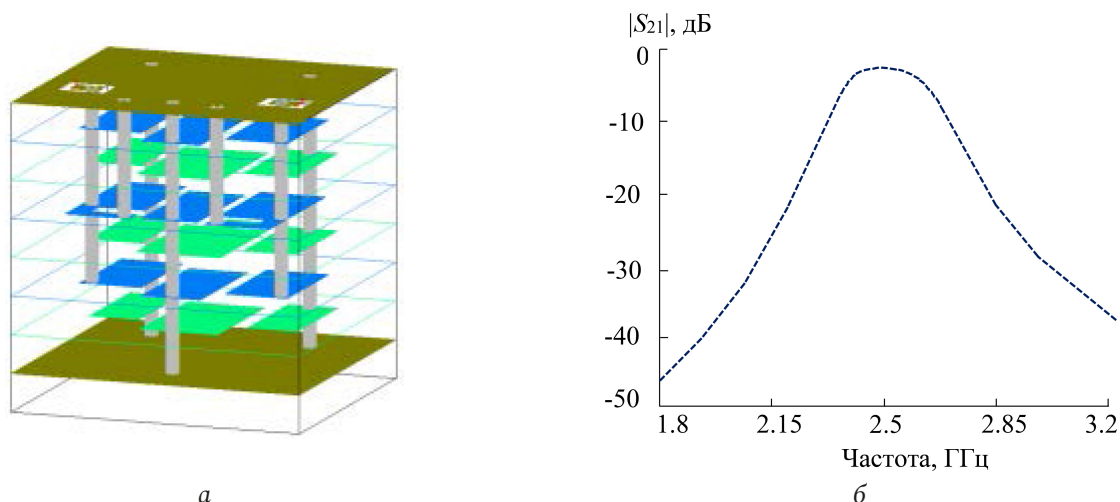


Рис. 6. Трехзвенный ПФ с Чебышевской характеристикой, реализованный с использованием квазисосредоточенных элементов: *a* – многослойная керамическая структура; *б* – АЧХ  
 Fig. 6. Three-section filter with Chebyshev characteristic, implemented with the use of quasi-lumped elements: *a* – multilayer ceramic structure; *b* – frequency response

(LTCC) [15] предоставляет широкие возможности для реализации СВЧ-устройств и функциональных модулей с использованием разнообразной элементной базы: квазисосредоточенных элементов, отрезков планарных линий передачи, интегрированных в подложку волноводов (substrate integrated waveguide – SIW) и т. п.

При реализации на элементах с распределенными параметрами фильтры имеют значительные размеры, особенно в нижней части СВЧ-диапазона, так как содержат четвертьволновые и полуволновые отрезки линий передачи. Габариты устройств могут быть существенно уменьшены при их реализации на элементах с сосредоточенными параметрами. Выполнение интегральных квазисосредоточенных элементов по технологии LTCC с использованием нескольких слоев (стековых плоскопараллельных конденсаторов и индуктивностей с витками, расположенными друг над другом) позволяет расширить диапазон реализуемых значений индуктивностей и емкостей по сравнению с однослойным исполнением и дополнительно уменьшить габариты СВЧ-устройств за счет высокой плотности компоновки элементов, размещаемых в объеме многослойной ИС [16],

По технологии LTCC можно создавать малогабаритные фильтры на квазисосредоточенных элементах для систем телекоммуникаций. К недостаткам таких устройств можно отнести сравнительно невысокую добротность интегральных квазисосредоточенных элементов, которая не позволяет реализовывать узкополосные фильтры с

достаточно низкими вносимыми потерями в полосе пропускания.

В качестве примера многослойной ИС на рис. 6 представлен ПФ третьего порядка, реализованный на сосредоточенных элементах, где емкостные элементы реализованы в виде плоскопараллельного конденсатора, размещенного в нескольких слоях структуры. Индуктивные элементы представляет собой симметричную полосковую линию шириной 200 мкм. Емкостная связь между резонаторами осуществляется за счет перекрытия обкладок емкостных элементов между собой. Структура состоит из 8 диэлектрических слоев керамики LTCC DuPont Green Tape 951 толщиной 92 мкм. Габаритный размер – 4,65×4,3 мм<sup>2</sup>, что составляет  $\lambda g/9 \times \lambda g/10$ , где  $\lambda g$  – длина волны в диэлектрическом материале. По результатам экспериментального исследования потери, вносимые фильтром в полосе пропускания, не превышают 3 дБ, коэффициент отражения по входу – меньше –20 дБ [17].

Известно, что объемные резонаторы характеризуются высокой собственной добротностью, что позволяет создавать на их основе узкополосные фильтры с низкими вносимыми потерями, но имеют значительные габариты. На объемных резонаторах с основной модой H<sub>110</sub>, вертикальный размер которых много меньше горизонтальных размеров, по технологии LTCC был реализован ряд полосно-пропускающих фильтров для миллиметрового диапазона длин волн. Введение в объемный резонатор емкостной нагрузки позволяет уменьшить размеры по сравнению с ненагружен-

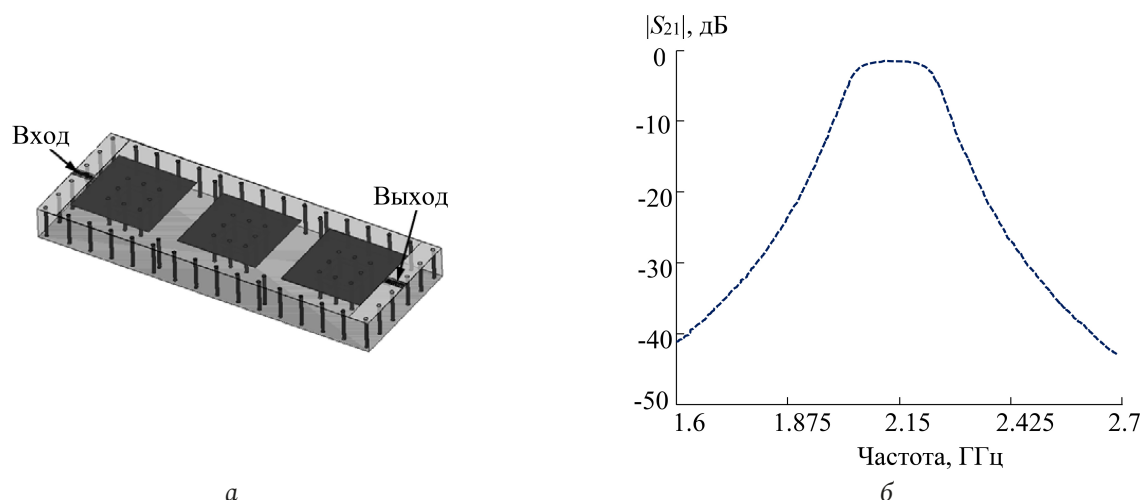


Рис. 7. Трехзвенный полосовой Чебышевский фильтр: *a* – многослойная керамическая структура; *b* – экспериментальная АЧХ  
Fig. 7. Three-section filter with Chebyshev characteristic: *a* – multilayer ceramic structure; *b* – experimental frequency response

ным резонатором. Емкостно-нагруженный объемный резонатор может иметь размеры, соизмеримые с квазисосредоточенным элементом, в то время как добротность такого резонатора в несколько раз выше добротности резонансного контура на квазисосредоточенных LC-элементах. На основе таких резонаторов можно создавать малогабаритные фильтры с уменьшенными вносимыми потерями для систем телекоммуникаций.

На рис. 7 представлены топология и характеристики трехзвенного полосно-пропускающего Чебышевского фильтра с полосой пропускания 100 МГц (4,6 %) на емкостно-нагруженных объемных резонаторах [18]. Связь между соседними резонаторами в составе фильтра организована при помощи диафрагмы в смежной стенке. Габаритные размеры фильтра составляют  $19 \times 7 \times 1,44$  мм<sup>3</sup>. По результатам экспериментального исследования потери, вносимые фильтром в полосе пропускания, не превышают 1,2 дБ, коэффициент отражения по входу – меньше –22 дБ.

Свойства ЛТСС-материалов и технологии их производства постоянно совершенствуются, приводя к улучшению их электрических характеристик, снижению стоимости и расширению областей использования. Производители передовых электронных устройств, работающих в СВЧ-диапазоне, проявляют большой интерес к данному классу керамики благодаря следующим его преимуществам и особенностям:

- механическая устойчивость и сохранение стабильных линейных размеров обеспечиваются малым коэффициентом теплового расширения, значение которого близко ко многим известным полупроводниковым материалам, что позволяет

устанавливать полупроводниковые кристаллы непосредственно на основание платы;

- низкая температура спекания (750...1000 °С), что существенно упрощает производственный процесс;

- низкие диэлектрические потери, стабильные в широком диапазоне частот. Для разных типов систем диэлектрическая проницаемость ЛТСС-керамики может варьироваться от 6 до 20, а тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,001 до 0,006 в СВЧ-диапазоне;

- возможность создания трехмерных структур до 100 и более рабочих слоев. ЛТСС-системы позволяют создавать полости, отверстия, использовать встроенные пассивные компоненты. Благодаря перечисленным достоинствам ЛТСС-технология успешно применяется производителями многослойных плат для ВЧ- и СВЧ-корпусов микросхем и электронных приборов, а также электронных компонентов, включая фильтры.

Отличительными особенностями фильтров, произведенных по данной технологии, являются:

- миниатюрные размеры;
- высокая повторяемость параметров;
- невысокая добротность интегральных квазисосредоточенных элементов, но может быть в несколько раз больше при объемном исполнении;
- применение вплоть до миллиметрового диапазона длин волн;
- стабильность к внешним воздействующим факторам;
- широкий рабочий температурный диапазон;
- невысокая цена при массовом производстве.



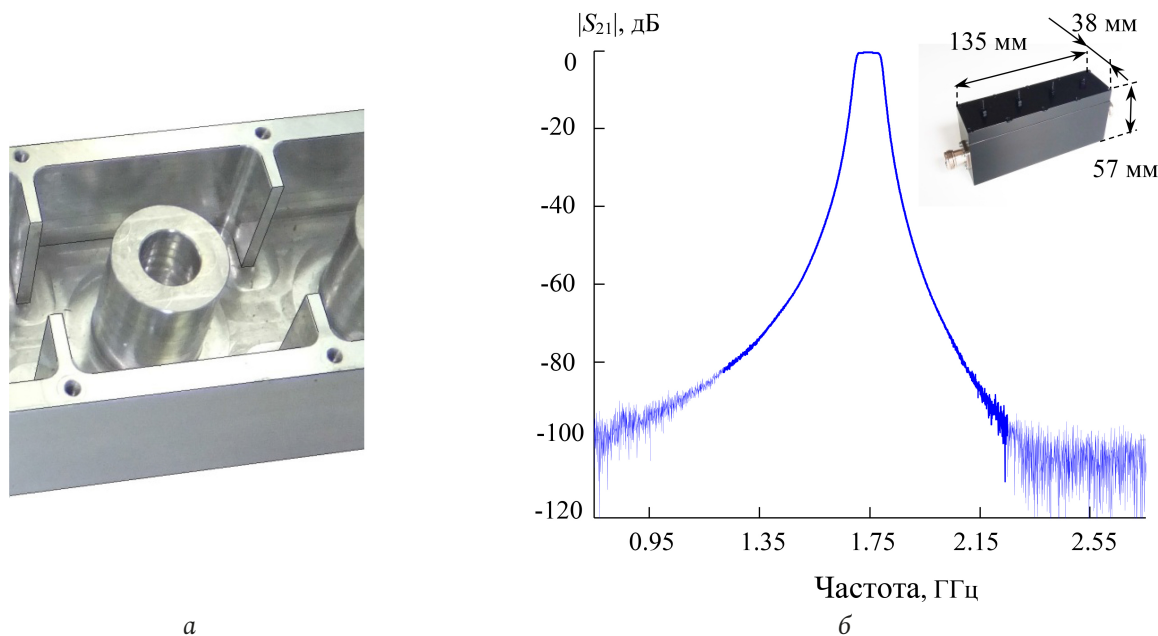


Рис. 8. Резонаторный полосовой фильтр: *a* – резонаторная полость; *б* – АЧХ  
 Fig. 8. Resonator bandpass filter: *a* – resonator cavity; *b* – frequency response

#### 2.4. Резонаторные фильтры на объемных металлических резонаторах (ОМР)

Резонаторные фильтры достаточно широко применяют в диапазоне частот от сотен МГц до единиц ГГц. Достоинствами таких фильтров являются простота расчета и реализации, возможность фильтровать сигналы высокой мощности, стабильность параметров. Принципиально фильтр такого типа представляет собой набор из отдельных резонаторов, коммутированных щелями, коротко замыкающими кабелями или емкостными элементами. Каждый резонатор является полостью, для сокращения размеров которой в ней имеется обычно цилиндрический металлический элемент, с одной стороны электрически замкнутый на стенку полости, а с другой – образующий емкость. При равных размерах полостей именно значением емкости обеспечивается установка каждому отдельному резонатору его частоты.

Резонаторные фильтры были впервые представлены в начале 1960-х годов, но широчайшее распространение получили вместе с сотовой связью – они применяются в базовых станциях. Наиболее применяемым способом обеспечения связи между резонаторами является использование щелей. Такие щели выполняются в стенках между двумя резонаторами, обеспечивая связь между ними. Основные типы применяемых щелей: вертикальная, горизонтальная и полувертикальная.

Для повышения связи (особенно для фильтров на частотах ниже 1 ГГц) в дополнение к щелям

применяются штыри между резонаторами. Чаще всего их располагают в центре щели, и такие штыри обеспечивают индуктивную связь между резонаторами, в отличие от щелей, обеспечивающих емкостную связь.

Для уменьшения размеров полостей фильтров можно использовать несколько приемов. Например, как в [19], заполнить полость диэлектрическим материалом. Таким материалом в [19] послужила керамика, но может быть любой другой диэлектрик. Керамика в данном случае позволяет делать металлизированную стенку и саму полость в одном технологическом цикле. Другим подходом к уменьшению полостей и размеров коаксиальных резонаторных фильтров является возбуждение сразу нескольких резонансных мод в одной полости [20]. В этих работах в одной полости возбуждается от двух до пяти мод. Это позволяет уменьшить размер фильтра на 25–50 %. Более внушительных результатов дает возможность достичь методика из [21]. Ее суть – в использовании не одного целого металлического столба в резонаторе, а нескольких (двух и более) трубчатых столбов, вставленных друг в друга коаксиально и присоединенных с чередованием к верхней и нижней стенкам полости резонатора.

Резонаторный полосовой СВЧ-фильтр и его АЧХ на рис. 8 содержат четыре резонатора, металлические вставки и элементы связи. Отличительной особенностью является то, что резонаторы

выполнены в виде цилиндров, в центре каждого из которых расположена металлическая вставка.

Диапазон рабочих частот полосовых резонаторных фильтров на объемных металлических резонаторах определяется допустимыми размерами и обычно такой тип фильтров используется для частот от 400 МГц до 10 ГГц, но иногда и на большие (до 40 ГГц). Вносимые потери для фильтров на частоты в несколько ГГц не превышают 1,5 дБ, а уровень подавления вне полосы может достигать 55 дБ. Кроме того, используя каскадирование и усложнение внутренних связей резонаторов, можно сделать АЧХ фильтра более резкой со стороны высоких или низких частот или же с обеих сторон. Фильтры характеризуются низким уровнем интермодуляций и возможностью работы с сигналами высокой мощности (до кВт).

Недостатком является расширение металла при нагревании и сжатие при охлаждении, что усложняет использование фильтра вне помещения из-за изменения настроек и дрейфа характеристик. Для решения этой проблемы резонаторы выполняются из биметаллического сплава, который имеет температурную стабильность.

#### 2.5. Фильтры на диэлектрических резонаторах и коаксиальных диэлектрических резонаторах

На данный момент существует два принципа построения фильтров данного класса: на основе дискретных объемных резонаторов и моноблочная конструкция [22–24]. Причем объемные резонаторы с применением диэлектрических включений или на основе диэлектрических материалов исторически именуют керамическими или диэлектрическими резонаторами (ДР) [22].

Работа диэлектрического резонатора основана на принципе объемного резонанса в диэлектрическом теле определенной формы, где накопление энергии происходит за счет полного внутреннего отражения электромагнитных волн на границе раздела сред.

Отдельной группой диэлектрических резонаторов являются металло-диэлектрические резонаторы (МДР). При их использовании рядом с ДР размещают металлические поверхности, которые служат для экранирования устройств. В составе МДР присутствуют два или более металлических и диэлектрических элементов.

Конструктивно ПФ на ДР представляет собой установленные на основание и соединенные между собой отдельные ДР, число которых определяется видом требуемой частотной характеристики.

Например, резонаторы могут быть образованы отверстиями в диэлектрическом блоке с внутренним слоем металлизации на поверхности отверстий. Поступающий на вход фильтра сигнал через связанные резонаторы поступает на выход. Конденсаторы связи отделены от резонатора зазором в металлизации внешней поверхности ДР.

Монолитный керамический фильтр в виде прямоугольного параллелепипеда с выполненными в нем отверстиями резонаторов, количество которых соответствует числу звеньев фильтра, в котором элементы входа и выхода расположены соосно относительно друг друга и перпендикулярно осям резонаторов, на пяти из шести граней которого, включая внутренние поверхности отверстий резонаторов, выполнен слой металлизации, отличающийся тем, что в монолитном керамическом фильтре на нижней грани выполнен металлизированный паз прямоугольной формы между отверстиями резонаторов, а на верхней грани реализована емкостная нагрузка резонаторов в виде проводящих площадок, которые одновременно являются дополнительными элементами емкостной связи между входом и выходом и подстроечными элементами.

Пример реализации фильтра 3-го порядка на ДР и его эквивалентная схема представлены на рис. 9.

*Особенности, достоинства, недостатки.*

Из недостатков диэлектрических резонаторов можно отметить чувствительность к влажности, низкую устойчивость к ударам и относительно высокую стоимость. Хотя современная технология производства при высокой температуре под давлением обеспечивает довольно высокое качество изготовления керамических материалов, они тем не менее остаются хорошо впитывающими влагу, что является критичным для мест их установки. При этом себестоимость сырья для изготовления керамических резонаторов существенно дороже, чем для металлических. Кроме того, процесс изготовления металлических резонаторов проще и дешевле, они значительно прочнее керамических и влагостойки. Но частотные характеристики керамических резонаторов значительно лучше по сравнению с металлическими, поэтому пользуются большим спросом.

Диэлектрические резонаторы используются в качестве фильтров для частот от 0,8 ГГц, но на таких относительно низких частотах их размеры будут слишком большие из-за увеличения длины волны, поэтому их выпускают для частот выше 1,5 ГГц.

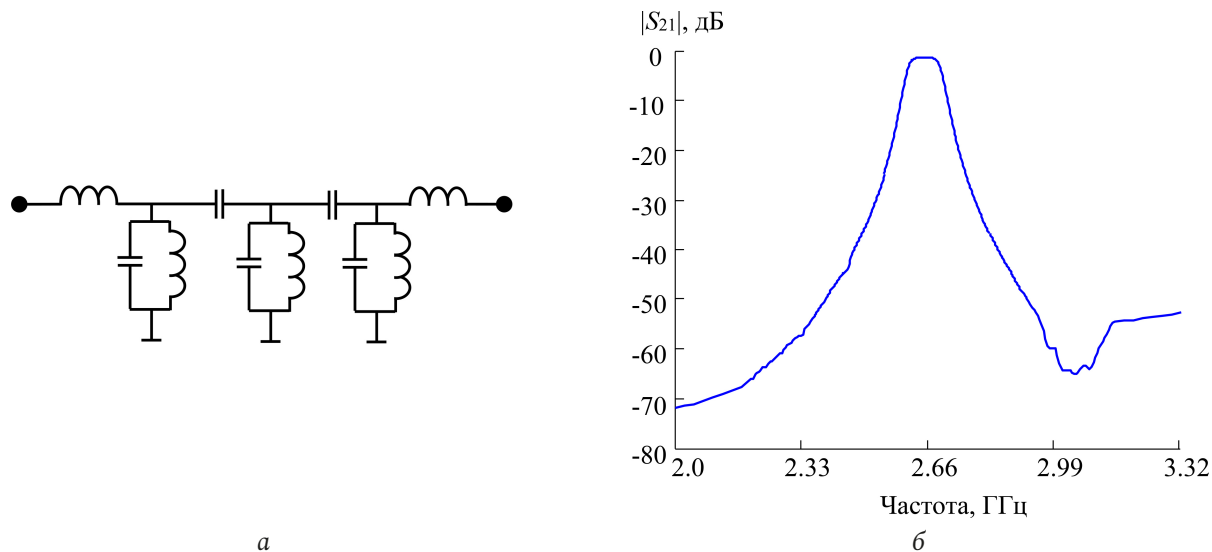


Рис. 9. Трехзвенный ПФ на связанных диэлектрических резонаторах: а – эквивалентная схема; б – АЧХ  
 Fig. 9. Three-section filter on dielectric redonators: a – equivalent circuit; b – frequency response

Основным недостатком фильтров на ДР и КДР является возможность реализации только узкополосных фильтров (относительная ширина полосы пропускания которых составляет не более 5–7 %). Преимущество – высокая механическая прочность, малые масса и габариты.

Прочие недостатки:

- низкая допустимая мощность;
- требуется высокая точность изготовления;
- процесс изготовления требует уникального оборудования и технологии.

Отдельным подклассом можно выделить фильтры коаксиального типа [25; 26], в которых фильтр состоит из некоторого числа отрезков коаксиальной линии и конденсаторов.

### 3. Пьезоэлектрические фильтры

#### 3.1. Фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ)

ПФ на ПАВ [1; 3] уверенно занимают нишу в диапазоне частот от десятков мегагерц до 3 ГГц благодаря своим габаритам, надежности и отличным радиотехническим характеристикам, однако они не обеспечивают мощность более нескольких сотен мВт. Из-за целого ряда технологических и физических ограничений универсальных конструктивно-топологических решений для перекрытия всего диапазона полос пропускания не существует [27–30]. Фильтры на ПАВ можно условно разделить на два больших класса:

- трансверсальные;
- резонаторные.

Преимуществом резонаторных фильтров являются малые вносимые потери –0,5...–4 дБ. Реали-

зуемые при этом полосы пропускания 0,01...8 %. Трансверсальные фильтры на ПАВ позволяют за счет функций аподизации и взвешивания ВШП создавать АЧХ и ФЧХ сложной формы. Полосы пропускания – до 80 %. Вносимые потери – от 6 до 40 дБ в зависимости от полосы пропускания.

В основе работы фильтров на ПАВ лежит пьезоэлектрический эффект. В качестве подложек используются монокристаллические пьезоэлектрические материалы. Для преобразования электрических сигналов в акустические и обратно используются металлизированные встречно-штыревые преобразователи (ВШП), нанесенные на поверхность пьезоэлектрической подложки. Достоинством ВШП является возможность в широких пределах изменять параметры возбуждаемых ПАВ. Это легко достигается за счет изменения геометрических размеров ВШП и проявляется в виде изменения частотной характеристики ВШП. Особенностью устройств на ПАВ является то, что энергия упругих колебаний сосредоточена в тонком приповерхностном слое пьезоэлектрической подложки.

В диапазоне частот 1–3 ГГц наиболее востребованными конструкциями являются резонаторные фильтры, поскольку они изготавливаются на ВШП с шириной электрода  $\lambda/4$  при расстоянии между электродами  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны. По классификации, предложенной в работе [1], резонаторные фильтры можно разделить на три большие группы: фильтры на продольных акустических модах, лестничные фильтры и фильтры на поперечных акустических модах.

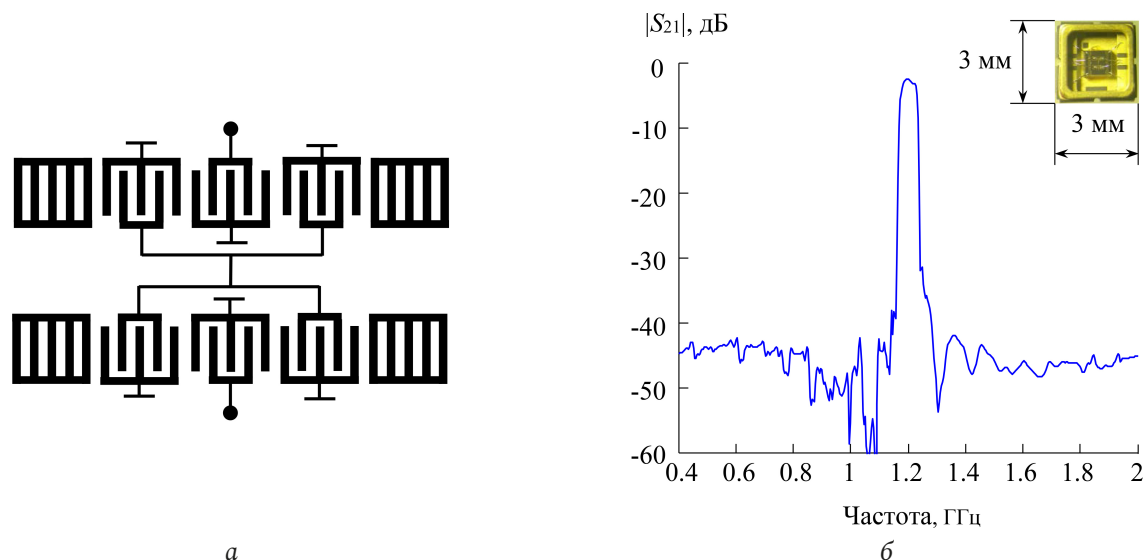


Рис. 10. Фильтр на ПАВ: *a* – топология; *б* – АЧХ  
Fig. 10. Surface acoustic wave filter: *a* – topology; *b* – frequency response

Типовая конструкция резонаторного типа в виде двухмодового фильтра на продольных акустических модах (в англ. литературе – это *double mode SAW filters (DMS)*) показаны на рис. 10, *a*. Представленная двухканальная схема, по сути, отражает каскадное включение двух звеньев DMS, что позволяет увеличить избирательность фильтра. Экспериментальная АЧХ данного фильтра отражена на рис. 10, *б*.

Важными особенностями, обеспечивающими постоянное и быстрое внедрение фильтров на ПАВ в современные радиоэлектронные системы, являются высокая надежность, малые массогабаритные параметры и отличные радиотехнические характеристики. Несмотря на то что такие технологии, как FBAR [1] и цифровая обработка сигналов, составляют серьезную конкуренцию и сокращают рынок устройств на ПАВ, развитие в области достижения предельных и критических параметров для фильтров на ПАВ позволяет выдерживать конкуренцию в некоторых направлениях. Например, системы, которые требуют низкого энергопотребления и высокого динамического диапазона по дальности действия (радары, базовые станции и спутники), по-прежнему включают фильтры на ПАВ в тракты приемной аппаратуры благодаря их отличным характеристикам по сравнению с другими технологиями. Постоянные улучшения в характеристиках устройств ПАВ и стремление достичь предельно возможных параметров являются необходимым условием, чтобы опережать технические достижения конкурирующих технологий. Высокая воспроизводимость и повторяемость ха-

рактеристик при массовом производстве тоже является неоспоримым достоинством.

Но все же технология ПАВ имеет ряд особенностей и ограничений, которые необходимо принимать во внимание при выборе ПФ. Во-первых, на центральную частоту ПАВ-фильтра влияют колебания температуры, что необходимо учитывать при выборе фильтра и обращать внимание на ТКЧ используемого материала. Во-вторых, предельная допустимая мощность составляет порядка 1 Вт. Не следует забывать, что для производства ПАВ-фильтров необходима высокая точность изготовления и процесс изготовления требует уникального оборудования и технологии.

### 3.2. Фильтры на объемных акустических волнах

Интерес к устройствам на объемных акустических волнах (ОАВ) обусловлен такими преимуществами, как низкие потери, миниатюрные размеры, низкая себестоимость и высокая степень интеграции в составе устройств, выполненных с использованием существующих интегральных технологий [31; 32]. Миниатюрные размеры обусловлены высокой акустической скоростью (скорость продольной объемной волны в пленке нитрида алюминия AlN составляет около 11 км/с), в то же время низкие потери обусловлены высокой акустической добротностью пьезоэлектрического материала в составе резонатора (~1000). Отдельный ОАВ-резонатор представляет собой пленку пьезоэлектрического материала с нанесенными на поверхности металлическими электродами. Как правило,

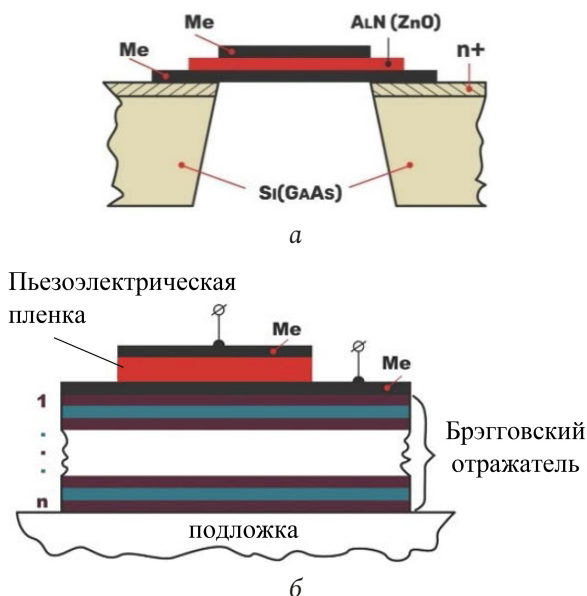


Рис. 11. Структура резонатора на ОАВ: *a* – тонкопленочный мембранный резонатор; *b* – многослойный резонатор с акустической изоляцией от подложки  
Fig. 11. Bulk acoustic wave (BAW) resonator structure: *a* – thin film membrane resonator; *b* – multilayer resonator with acoustic isolation from the substrate

в составе полосовых фильтров СВЧ используются несколько основных типов конструкций резонаторов на ОАВ (рис. 11): резонаторы мембранного [31] типа и резонаторы с брэгговским отражателем [32; 33]. Как правило, полосовые фильтры реализуются на основе либо электрически, либо акустически связанных резонаторов, которые настроены на определенные частоты для обеспечения заданных частотных характеристик. При реализации лестничной структуры ПФ на основе резонаторов на ОАВ частотные характеристики модуля коэффициента передачи имеют симметричные нули относительно полосы пропускания, которые обусловлены частотными свойствами акустических резонаторов. Частотная зависимость входного электрического импеданса резонаторов на ОАВ характеризуется наличием двух резонансов: резонанса и антирезонанса. Синтез ПФ на ОАВ резонаторах заключается в нахождении положения нулей и полюсов характеристики передачи с тем, чтобы получить наименьший уровень пульсаций коэффициента отражения в полосе пропускания и наибольшее ослабление в полосе запираания [34]. Пример АЧХ ПФ лестничного типа, представляющий собой каскадное включение последовательных и параллельных звеньев резонаторов на ОАВ, представлен на рис. 12.

Отличительными особенностями фильтров на ОАВ являются:

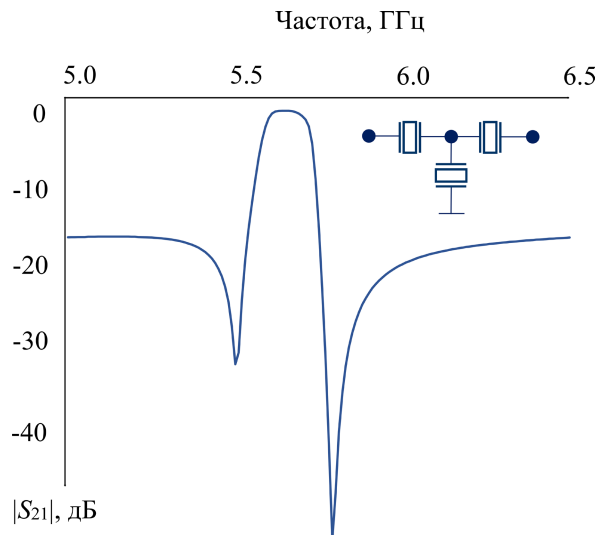


Рис. 12. АЧХ фильтра на ОАВ  
Fig. 12. BAW filter frequency response

- миниатюрные размеры по сравнению со всеми типами ПФ;
- высокая степень интеграции;
- высокая добротность резонаторов, низкие потери;
- высокая избирательность за счет нулей передачи, однако ограничение ширины полосы пропускания;
- низкая предельная допустимая мощность (порядка 1 Вт), предполагающая использование в составе приемных трактов первичной обработки сигналов;
- зависимость от температурного режима, что требует температурной стабилизации;
- требование высокой точности изготовления, высокого качества эпитаксиальных слоев, уникального оборудования и технологии изготовления.

## Обсуждение результатов

Рассмотренные типы фильтров находят широкое применение в различной радиоаппаратуре. Области применения часто пересекаются и могут быть взаимозаменяемы. Однако каждый из рассмотренных фильтров имеет свои преимущества и недостатки. Конкретное применение зависит от ТТХ проектируемой системы, конструктор и разработчик должны ответственно подходить к выбору фильтров в зависимости от характеристик.

Представленный анализ различных решений для ПФ в диапазоне от сотен мегагерц до единиц гигагерц позволяет выделить некоторые, но очень важные достоинства для каждого класса рассматриваемых фильтров (в серийном исполнении) и свести их в таблицу. У разработчика радиоаппара-

Таблица. Сравнение характеристик полосовых фильтров  
Table. Comparison of characteristics of bandpass filters

Тип ПФ / Достоинства	LC-фильтры	МПФ	LTCC-фильтры	Фильтры на основе ВТСП	Фильтры на ДР	Резонаторные фильтры на ОМР	Фильтры на ОАВ	Фильтры на ПАВ
Рабочие частоты	+	++	++	++	++	++	++	+
Вариативность схемотехнических решений	++	+	++	+	+	+	-	++
Требование к технологии	-	+	+++	++	+	-	+++	++
Малые габариты	+	+	+	-	+	-	+++	++
Потери	-	+	+	+++*	++	++	++	++
Избирательность	+	+	+	+++	++	++	++	++**
Рабочая мощность	+	+	-	+	+	++	-	-
Возможность выбора относительной полосы пропускания	+	+	+	+	+	+	-	+***

\* Требуется криогенное обеспечение для поддержания рабочих условий ВТСП.

\*\* Предельно-достижимые характеристики коэффициента прямоугольности для фильтров на ПАВ составляют значение 1,05, серийно выпускаемые – 1,2 [29].

\*\*\* Полоса пропускания для фильтров на ПАВ 0,01...80 % [27; 29].

туры есть возможность делать выбор в пользу тех или иных типов фильтров в зависимости от решаемых им задач.

### Заключение

Рассмотренные в работе пассивные полосовые фильтры позволяют реализовать устройства частотной селекции на рабочих частотах до 6 ГГц и выше с учетом современных системных тенденций и требований к устройствам такого типа:

- повышение рабочих частот;
- улучшение температурной стабильности;
- увеличение входной мощности проходящего сигнала;
- обеспечение предельных характеристик ПФ:
  - снижение вносимого затухания;
  - увеличение гарантированного относительного затухания в полосе заграждения;

- уменьшение неравномерности АЧХ в полосе пропускания;
- уменьшение неравномерности группового времени задержки в полосе пропускания;
- высокая избирательность или улучшенный коэффициент прямоугольности;
- минимизация коэффициента стоячей волны;
- обеспечение независимости от элементной базы иностранного производства;
- переход на современные принципы компоновки радиоэлектронной аппаратуры;
- повышение плотности монтажа;
- снижение массогабаритных характеристик аппаратуры.

Правильный выбор ПФ обеспечивает улучшение необходимых эксплуатационных параметров радиоэлектронной аппаратуры.

### Список литературы

1. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / Г.М. Аристархов [и др.]. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
2. Hong J., Lancaster M.J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2001. 457 p.
3. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О.Л. Балышева [и др.]. М.: Радиотехника, 2012. 576 с.

4. Забегайло И.В., Тюменцев А.И., Хроленко Т.С. Полосовые перестраиваемые фильтры с использованием варикапов в широком диапазоне частот // *Техника радиосвязи*. 2014. № 3. С. 100–106.
5. Белов Л. Корпорация Micro lambda Wireless. СВЧ-приборы с ЖИГ-перестройкой // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. № 8. С. 60–67.
6. Фирсенков А.И., Козин А.Э. Перестраиваемые полосно-пропускающие СВЧ-фильтры на магнитостатических волнах // *Техника радиосвязи*. 2016. № 4. С. 92–101.
7. Перестраиваемые СВЧ-фильтры с управляемыми сегнетоэлектрическими конденсаторами / Е.Ю. Замшаева [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, № 18. С. 87–94. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14616>
8. Бабунько С.А., Белов Ю.Г., Когтева Л.В. О построении электрических схем полосовых фильтров на SMD-элементах // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2011. Т. 14, № 4. С. 28–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17272408>
9. Захаров А.В., Розенко С.А. Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры с паразитными связями, содержащие четвертьволновые и П-образные резонаторы // *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64, № 4. С. 409–418.
10. Аристархов Г.М., Звездинов Н.В. Высокоизбирательные одно- и двухрезонаторные микрополосковые фильтры // *Радиотехника и электроника*. 2017. Т. 62, № 8. С. 819–824.
11. Миниатюрный фильтр на подвешенной подложке с двухсторонним рисунком полосковых проводников / Б.А. Беляев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42, № 12. С. 30–37. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/43224>
12. Narrowband Y-Ba-Cu-O filter with quasi-elliptic characteristic / I.B. Vendik [et al.] // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2001. Vol. 11, no. 1. P. 477–480. DOI: <https://doi.org/10.1109/77.919386>
13. Моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых резонаторов и фильтра на основе высокотемпературного сверхпроводника / М.Ф. Ситникова [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36, № 18. С. 67–74. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/14147>
14. Особенности технологии пленок высокотемпературных сверхпроводников для СВЧ-фильтров / И.Б. Вендик [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37, № 9. С. 64–69. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/12551>
15. Симин А., Холодняк Д., Вендик И. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // *Компоненты и технологии*. 2005. № 5. С. 190–196.
16. Малогабаритные СВЧ-устройства с применением технологии LTCC / Д.В. Холодняк [и др.] // *Радиотехника*. 2012. № 7. С. 132–137.
17. Design and investigation of miniaturized high-performance LTCC filters for wireless communications / V. Piatnitsa [et al.] // *Proceedings of the 37<sup>th</sup> European Microwave Conference*. 2007. P. 544–547. DOI: <https://doi.org/10.1109/EUMC.2007.4405248>
18. Small-size low-loss bandpass filters on substrate-integrated waveguide capacitively loaded cavities embedded in low temperature co-fired ceramics / V. Turgaliev [et al.] // *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2015. Vol. 6, no. 4. P. 305–314. DOI: <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00053>
19. Rahman M.M., Wang W., Wilber W.D. A compact triple-mode plated ceramic block based hybrid filter for base station applications radio frequency systems // *Proceedings of the 34th European Microwave Conference*. 2004. P. 1001–1004.
20. Compact doublet structure for quasi-elliptical filters using stereolithographic 3D printing / C. Tomassoni [et al.] // *Proceedings of the 47th European Microwave Conference*. 2017. P. 993–996. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231013>
21. Li Z.M., Sledkov V.A., Zemlyakov V.V. The compact bandpass cavity filter on multi-cylinder coaxial resonators // *2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL)*. 2019. P. 3122–3125. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021631>
22. Геворкян В., Кочемасов В. Объемные диэлектрические Резонаторы. основные типы, характеристики, производители. Часть 1 // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2016. № 4. С. 62–77.
23. Козлов В.А., Кунилов А.Л., Ивойлова М.М. Современное состояние и перспективы развития проектирования и технологии керамических фильтров для бортовой СВЧ-аппаратуры // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2019. Т. 22, № 4. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.61-67>
24. Полосовые металлокерамические фильтры с копланарными элементами связи / А.Ю. Беляков [и др.] // *Вестник Новгородского государственного университета*. 2016. № 7. С. 71–73. URL: <https://portal.novsu.ru/vestnik/vestnik/i.78099/?article=1277916>
25. Зикий А.Н., Кочубей А.С. Полосовые фильтры коаксиального типа // *Развитие науки в эпоху цифровизации: проблемы, тенденции, прогнозы*. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2019. С. 137–148.
26. Analysis, design and simulation of a compact wide band VHF high power tubular band pass filter / Z. Pourgholamhossein [et al.] // *2014 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2014. P. 966–971.
27. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации / А. Багдасарян [и др.] // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013. № 8. С. 128–136.
28. Прапорщиков В., Орлов В. Фильтры на ПАВ. Краткий обзор и методы расчета // *СВЧ-электроника*. 2020. № 3. С. 40–47. URL: <https://microwave-e.ru/moduls/filtry-na-pav>
29. Койгеров А.С. Достижение критических и предельных параметров в микроприборах на поверхностных акустических волнах // *Нано- и микросистемная техника*. 2022. Т. 24, № 4. С. 199–207.
30. Койгеров А.С. Моделирование методом конечных элементов устройств на поверхностных акустических волнах с использованием пакета COMSOL // *Микроэлектроника*. 2022. Т. 51, № 4. С. 272–282.
31. Lakin K.M., Kline G.R., McCarron K.T. High-Q microwave acoustic resonators and filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1993. Vol. 41, no. 12. P. 2139–2146. DOI: <https://doi.org/10.1109/22.260698>
32. СВЧ акустоэлектронные компоненты / М.Ю. Двошерстов [и др.] // *Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника*. 2018. № 4. С. 19–30.

33. Modelling of tunable bulk acoustic resonators and filters with induced piezoelectric effect in BSTO film in a wide temperature range / P.A. Turalchuk [et al.] // Proc. of the 37th European Microwave Conference. EUMC. 2007. P. 282–285. DOI: <https://doi.org/10.1109/eurcon.2009.5167605>
34. Туральчук П.А., Вендик И.Б. Синтез полосовых фильтров на объемных акустических волнах с учетом материальных параметров многослойной структуры резонаторов // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 6. С. 611–617. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320791922050124>

### Информация об авторах

**Койгеров Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук (2011), доцент (2021) кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия. Автор 45 научных публикаций.

*Область научных интересов:* проектирование устройств на поверхностных акустических волнах.

*E-mail:* [a.koigerov@gmail.ru](mailto:a.koigerov@gmail.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

**Туральчук Павел Анатольевич**, кандидат физико-математических наук (2010), доцент (2015) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных публикаций.

*Область научных интересов:* антенны и устройства СВЧ-микрорелектроники.

*E-mail:* [paturalchuk@etu.ru](mailto:paturalchuk@etu.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-2520-9962>

**Деркач Михаил Михайлович**, кандидат технических наук (2017), научный сотрудник АО «НПП «Радар ммс», г. Санкт-Петербург, Россия. Автор 18 научных публикаций.

*Область научных интересов:* моделирование устройств СВЧ-электроники, МЭМС.

*E-mail:* [garuspik1987@yandex.ru](mailto:garuspik1987@yandex.ru)

**Андрейчев Сергей Сергеевич**, исполнительный директор ООО «СВЧ решения», г. Санкт-Петербург, Россия. Автор 5 научных публикаций.

*Область научных интересов:* устройства СВЧ-электроники, микрополосковые фильтры.

*E-mail:* [andreychev.s@gmail.com](mailto:andreychev.s@gmail.com)

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2024, vol. 27, no. 1, pp. 71–88

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.1.71-88](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.1.71-88)

UDC 621.37

Original Research

Received 4 September 2023

Accepted 6 October 2023

Published 29 March 2024

### Passive bandpass filters for modern microwave communication systems

Aleksey S. Koigerov<sup>1</sup> , Pavel A. Turalchuk<sup>1</sup> , Mikhail M. Derkach<sup>2</sup>, Sergey S. Andreychev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University

5, Professora Popova Street,  
Saint Petersburg, 197376, Russia

<sup>2</sup> JSC «Radar-mms»

37, Novoselkovskaya Steet,  
Saint Petersburg, 197375, Russia

<sup>3</sup> LLC «MW Solutions»

19, bld. H, Promyshlennaya Street,  
Saint Petersburg, 198095, Russia

**Abstract – Background.** Bandpass filters are an integral part of any radio engineering systems and modern communication systems. Research and development of new passive components is due to growing need for such elements for modernization and creation of new modern communication systems. **Aim.** A brief overview of passive bandpass filters. Their classification according to the type of implementation is given. **Methods.** Results of experimental research and design of different passive bandpass filters are considered. **Results.** Lumped elements filters, microstrip filters, filters on high-temperature superconductor films, filter on dielectric resonators, surface acoustic wave filters, bulk acoustic wave filters are considered. At a qualitative level, the main advantages and disadvantages are considered from point of view of electrical parameters and size indicators. Examples of topological and constructive implementation are given. **Conclusion.** The passive bandpass filters considered in the paper make it possible to implement frequency selection devices at operating frequencies up to 6 GHz and higher, taking into account modern system trends and requirements for devices of this type.

**Keywords** – bandpass filters; SAW filters; BAW; microstrip filters; HTS filter; LTCC; ceramic filter; cavity resonator.



## References

1. G. M. Aristarkhov et al., *Filtering and Spectral Analysis of Radio Signals. Algorithms. Structures. Devices*. Moscow: Radiotekhnika, 2020. (In Russ.)
2. J. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2001.
3. O. L. Balysheva et al., *Acoustoelectronic Devices for Signal Processing and Generation. Principles of Work, Calculation and Design*. Moscow: Radiotekhnika, 2012. (In Russ.)
4. I. V. Zabegaylo, A. I. Tyumentsev, and T. S. Khrolenko, "Bandpass tunable filters using varicaps over a wide frequency range," *Tekhnika radiosvyazi*, no. 3, pp. 100–106, 2014. (In Russ.)
5. L. Belov, "Micro lambda Wireless Corporation. Microwave devices with YIG tuning," *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, no. 8, pp. 60–67, 2010. (In Russ.)
6. A. I. Firsencov and A. E. Kozin, "Tunable bandpass microwave filters based on magnetostatic waves," *Tekhnika radiosvyazi*, no. 4, pp. 92–101, 2016. (In Russ.)
7. E. Yu. Zameshaeva et al., "Tunable microwave filters with controlled ferroelectric capacitors," *Pis'ma v ZhTF*, vol. 39, no. 18, pp. 87–94, 2013, url: <https://journals.ioffe.ru/articles/14616>. (In Russ.)
8. S. A. Babun'ko, Yu. G. Belov, and L. V. Kogteva, "About building of the circuitry bandpass filters at SMD-elements," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 28–35, 2011, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17272408>. (In Russ.)
9. A. V. Zakharov and S. A. Rozenko, "Microstrip bandpass filters with parasitic couplings containing quarter-wave and U-shaped resonators," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 64, no. 4, pp. 409–418, 2019. (In Russ.)
10. G. M. Aristarkhov and N. V. Zvezdinov, "Highly selective single and dual cavity microstrip filters," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 62, no. 8, pp. 819–824, 2017. (In Russ.)
11. B. A. Belyaev et al., "Miniature suspended filter with double-sided stripe pattern," *Pis'ma v ZhTF*, vol. 42, no. 12, pp. 30–37, 2016, url: <https://journals.ioffe.ru/articles/43224>. (In Russ.)
12. I. B. Vendik et al., "Narrowband Y-Ba-Cu-O filter with quasi-elliptic characteristic," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 477–480, 2001, doi: <https://doi.org/10.1109/77.919386>.
13. M. F. Sitnikova et al., "Modeling and experimental study of microstrip resonators and a filter based on a high-temperature superconductor," *Pis'ma v ZhTF*, vol. 36, no. 18, pp. 67–74, 2010, url: <https://journals.ioffe.ru/articles/14147>. (In Russ.)
14. I. B. Vendik et al., "Features of high-temperature superconductor film technology for microwave filters," *Pis'ma v ZhTF*, vol. 37, no. 9, pp. 64–69, 2011, url: <https://journals.ioffe.ru/articles/12551>. (In Russ.)
15. A. Simin, D. Kholodnyak, and I. Vendik, "Multilayer microwave integrated circuits based on low firing temperature ceramics," *Komponenty i tekhnologii*, no. 5, pp. 190–196, 2005. (In Russ.)
16. D. V. Kholodnyak et al., "Small-sized microwave devices using LTCC technology," *Radiotekhnika*, no. 7, pp. 132–137, 2012. (In Russ.)
17. V. Piatnitsa et al., "Design and investigation of miniaturized high-performance LTCC filters for wireless communications," *Proceedings of the 37th European Microwave Conference*, pp. 544–547, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/EUMC.2007.4405248>.
18. V. Turgaliev et al., "Small-size low-loss bandpass filters on substrate-integrated waveguide capacitively loaded cavities embedded in low temperature co-fired ceramics," *Journal of Ceramic Science and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 305–314, 2015, doi: <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00053>.
19. M. M. Rahman, W. Wang, and W. D. Wilber, "A compact triple-mode plated ceramic block based hybrid filter for base station applications radio frequency systems," *Proceedings of the 34th European Microwave Conference*, pp. 1001–1004, 2004.
20. C. Tomassoni et al., "Compact doublet structure for quasi-elliptical filters using stereolithographic 3D printing," *Proceedings of the 47th European Microwave Conference*, pp. 993–996, 2017, doi: <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231013>.
21. Z. M. Li, V. A. Sledkov, and V. V. Zemlyakov, "The compact bandpass cavity filter on multi-cylinder coaxial resonators," *2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL)*, pp. 3122–3125, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021631>.
22. V. Gevorkyan and V. Kochemasov, "Volumetric dielectric resonators. main types, characteristics, manufacturers. Part 1," *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, no. 4, pp. 62–77, 2016. (In Russ.)
23. V. A. Kozlov, A. L. Kunilov, and M. M. Ivoylova, "Current state and development prospects of design and technology of ceramic filters for on-board microwave equipment," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 61–67, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.61-67>. (In Russ.)
24. A. Yu. Belyakov et al., "Bandpass metal-ceramic filters with coplanar coupling elements," *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 7, pp. 71–73, 2016, url: <https://portal.novsu.ru/vestnik/vestnik/i.78099/?article=1277916>. (In Russ.)
25. A. N. Zikiy and A. S. Kochubey, "Coaxial bandpass filters," in *Development of Science in the Era of Digitalization: Problems, Trends, Forecasts*. Petrozavodsk: MTsNP «Novaya nauka», 2019, pp. 137–148. (In Russ.)
26. Z. Pourgholamhossein et al., "Analysis, design and simulation of a compact wide band VHF high power tubular band pass filter," *2014 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, pp. 966–971, 2014.
27. A. Bagdasaryan et al., "SAW frequency selection devices in modern communication systems, radar and telecommunications," *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, no. 8, pp. 128–136, 2013. (In Russ.)
28. V. Praporshchikov and V. Orlov, "Surfactant filters. Brief overview and calculation methods," *SVCh-elektronika*, no. 3, pp. 40–47, 2020, url: <https://microwave-e.ru/moduls/filtry-na-pav>. (In Russ.)

29. A. S. Koigerov, "Achieving critical and limiting parameters in microdevices using surface acoustic waves," *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 24, no. 4, pp. 199–207, 2022. (In Russ.)
30. A. S. Koigerov, "Finite element modeling of surface acoustic wave devices using COMSOL," *Mikroelektronika*, vol. 51, no. 4, pp. 272–282, 2022. (In Russ.)
31. K. M. Lakin, G. R. Kline, and K. T. McCarron, "High-Q microwave acoustic resonators and filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 12, pp. 2139–2146, 1993, doi: <https://doi.org/10.1109/22.260698>.
32. M. Yu. Dvoesherstov et al., "Microwave acoustoelectronic components," *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh-tekhnika*, no. 4, pp. 19–30, 2018. (In Russ.)
33. P. A. Turalchuk et al., "Modelling of tunable bulk acoustic resonators and filters with induced piezoelectric effect in BSTO film in a wide temperature range," *Proc. of the 37th European Microwave Conference. EUMC*, pp. 282–285, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167605>.
34. P. A. Turalchuk and I. B. Vendik, "Synthesis of bandpass filters based on volumetric acoustic waves, taking into account the material parameters of the multilayer structure of resonators," *Akusticheskiy zhurnal*, vol. 68, no. 6, pp. 611–617, 2022, doi: <https://doi.org/10.31857/S0320791922050124>. (In Russ.)

### Information about the Authors

Aleksey S. Koigerov, Candidate of Technical Sciences (2011), associate professor (2021) of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia. Author of 45 scientific publications.

*Research interests:* design surface acoustic wave devices.

*E-mail:* [a.koigerov@gmail.ru](mailto:a.koigerov@gmail.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

Pavel A. Turalchuk, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (2010), associate professor (2015) of the Department of Microelectronics and Radioengineering, Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia. Author of over 100 scientific publications.

*Research interests:* antennas and devices of microwave microelectronics.

*E-mail:* [paturalchuk@etu.ru](mailto:paturalchuk@etu.ru)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-2520-9962>

Mikhail M. Derkach, Candidate of Technical Sciences (2017), scientific worker of JSC «Radar-mms», Saint Petersburg, Russia. Author of 18 scientific papers.

*Research interests:* modeling of microwave electronics devices, MEMS.

*E-mail:* [garuspik1987@yandex.ru](mailto:garuspik1987@yandex.ru)

Sergey S. Andreychev, executive director of LLC «MW Solutions», Saint Petersburg, Russia. Author of 5 scientific papers.

*Research interests:* microwave electronics devices, microstrip filters.

*E-mail:* [andreychev.s@gmail.com](mailto:andreychev.s@gmail.com)