

# Современные сверхширокополосные фильтры

на поверхностных акустических волнах

Статья посвящена новейшим сверхширокополосным ПАВ-фильтрам российского производства на базе однофазных однонаправленных ВШП. Приведена общая классификация ПАВ-фильтров. В качестве примера представлены три образца, разработанные и произведенные в ОАО «МНИИРС», описаны их преимущества и даны пояснения, за счет чего удалось достичь определенных успехов.

**Ключевые слова:** поверхностная акустическая волна (ПАВ), широкополосный фильтр, квазивеерный однофазный однонаправленный преобразователь (ОФНП), полоса пропускания, пульсации амплитуды, неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ), российский производитель.

Илья Туркин  
stor007@bk.ru

Сергей Тимошенко, д. т. н.,  
профессор

Александр Краснопольский, д. т. н.,  
профессор

## Введение

Практически все современные коммуникационные приборы, от мобильного телефона и систем навигации ГЛОНАСС и GPS до систем аэрокосмической связи и радиолокации, используют различные частотно-избирательные устройства. Значительная их часть основывается на принципе акустоэлектронного взаимодействия анизотропной кристаллической решетки пьезоэлектрика и слоя напыленных на нее металлических электродов, возбуждающих под действием переменного электромагнитного поля поверхностную акустическую волну (ПАВ). Давно известно, что по сравнению с фильтрами, построенными на других физических принципах, ПАВ-фильтры обладают рядом преимуществ: технологичность, малые габариты, возможность установки в корпуса для поверхностного монтажа, высокая механическая прочность, температурная стабильность, малые вносимые потери и большое гарантированное затухание в полосе заграждения (40–60 дБ).

## Особенности фильтров на ПАВ и актуальность широкополосной фильтрации в области промежуточных частот

Полосовые ПАВ-фильтры можно разделить на два основных типа: резонаторные и трансверсальные. Применение резонаторных фильтров в технике обусловлено их малыми потерями (около 3–10 дБ), очень узкой полосой (0,01–5%) и низким уровнем сигнала в полосе заграждения (порядка –50–60 дБ от основного сигнала). Трансверсальные фильтры имеют несколько большие потери (около 7–25 дБ в зависимости от типа ВШП и широкополосности), зато позволяют реализовать широкий диапазон полос пропускания (1–50% и более), добиться коэффициента прямоугольности,

### Список использованных сокращений

ПАВ — поверхностная акустическая волна  
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика  
ГВЗ — групповое время запаздывания  
ИХ — импульсная характеристика  
ВШП — встречно-штыревой преобразователь  
МПО — многополосковый ответвитель  
ОФНП — однофазный однонаправленный преобразователь  
QSPUDT — quasi-slanted single phase unidirectional transducer  
ЭМ — электромагнитный  
SMD (Surface Montage Device) — устройство для поверхностного монтажа

близкого к единице, и малых пульсаций АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания. Оба типа фильтров имеют хорошую температурную стабильность, обусловленную типом используемых пьезокристаллов, основными из которых являются: ниобат лития (~70–94 ppm/°C), танталат лития (~30 ppm/°C) или пьезокварц (~0,05 ppm/°C). В зависимости от ширины полосы пропускания используется тот или иной материал подложки: кварц для узкополосных, танталат лития — для широкополосных и ниобат лития — для широкополосных фильтров.

Современный российский рынок преимущественно насыщен фильтрами зарубежных производителей, ориентированных, главным образом, на применение в бытовой электронике массового производства. Однако спрос на ПАВ-фильтры в России выходит далеко за эти пределы, предполагая разработку и реализацию фильтров под конкретные прикладные задачи.

Постоянное расширение полосы пропускания различных приемо-передающих устройств

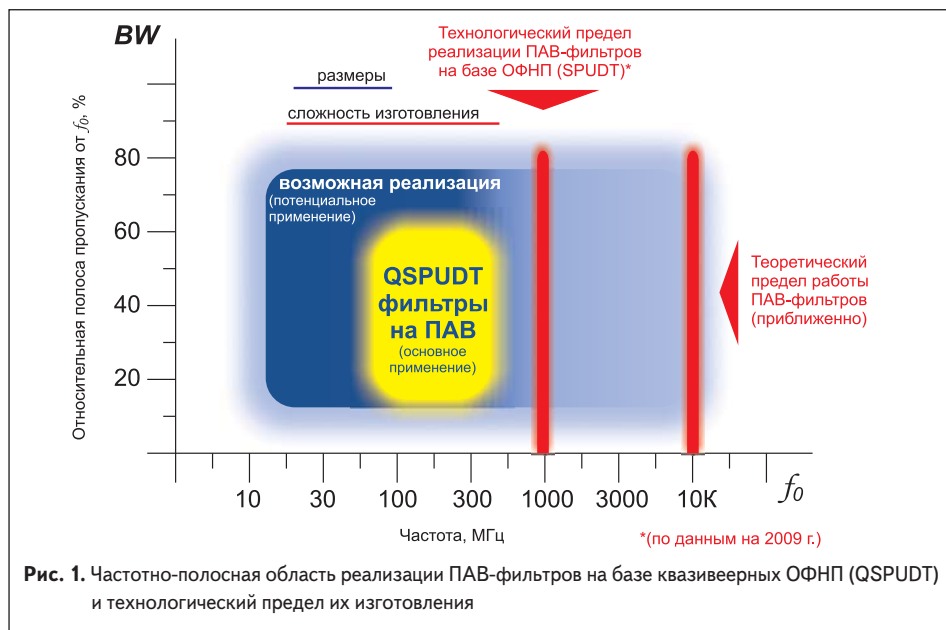


Таблица 1. Условная классификация фильтров на ПАВ по полосам пропускания, используемые пьезокристаллы и типы фильтров

| Класс фильтров на ПАВ | $BW_3^*$ , % | Используемые типы фильтров                    | Используемые пьезокристаллы     |
|-----------------------|--------------|---|---------------------------------|
| Сверхширокополосные   | > 40         | на базе ОФНП                                  | ниобат лития                    |
| Широкополосные        | 15–40        | на базе ВШП с МПО, на базе ОФНП               | ниобат лития                    |
| Среднеполосные        | 5–15         | на базе ВШП с МПО, на базе ОФНП               | ниобат лития, танталат лития    |
| Узкополосные          | 1–5          | Резонаторные, на базе ВШП с МПО, на базе ОФНП | танталат лития, кварц, лангасит |

Примечание: \* $BW_3$  (Bandwidth) – полоса пропускания по уровню –3 дБ от максимума

обуславливает все возрастающую нагрузку на частотный диапазон. В этих условиях особо актуальной становится задача фильтрации широкополосного сигнала с использованием промежуточной частоты, так как в этом случае значительно снижается влияние температурного коэффициента частоты (ТКЧ) и уменьшается доля переходной полосы от исходной частоты. Относительно невысокая технологическая требовательность при производстве, а также современные успехи в области снижения потерь и пульсаций в полосе пропускания трансверсальных ПАВ-фильтров позволяют говорить о значительном повышении их конкурентоспособности по сравнению с другими типами фильтров.

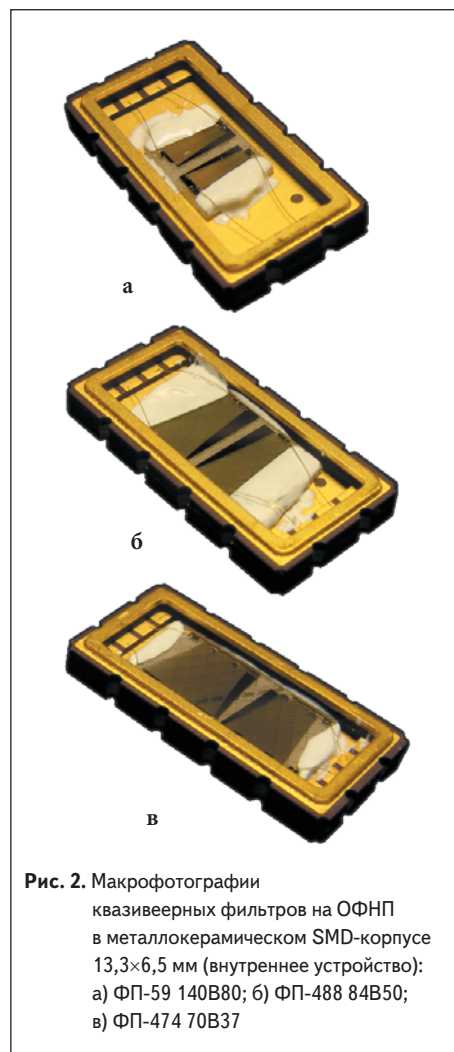
### Постановка задачи

Последнее время на рынке увеличился спрос на широкополосные (полоса пропускания ~15–30% от  $f_0$ ) и сверхширокополосные (30–75% от  $f_0$ ) фильтры промежуточных частот (~70–140 МГц). Это связано с тем, что более широкий частотный диапазон позволяет реализовать в устройствах связи большую пропускную способность. Вторым важнейшим требованием к фильтру является хорошая избирательность сигнала. Фильтров, обладающих широкополосностью ( $BW > 30\%$ ), большим затуханием сигнала за полосой (>40 дБ) и при этом сравнительно малыми потерями (<25 дБ), на российском и мировом рынках

ПАВ-устройств практически нет, в то время как потребность в них в современной аппаратуре велика.

Этим требованиям в значительной степени отвечают трансверсальные ПАВ-фильтры на базе квазиеверных однофазных однонаправленных преобразователей (ОФНП, QSPUDT) на пьезокристаллах ниобата лития. Частотно-полосная область их эффективной и потенциальной реализации, классификация, используемые материалы, а также технологический предел их изготовления приблизительно показаны ниже, на диаграмме рис. 1 и в таблице 1.

Из диаграммы на рис. 1 видно, что область наиболее эффективного применения квазиеверных фильтров на ОФНП (QSPUDT) лежит в диапазоне частот ~70–450 МГц и полос пропускания ~7–65% от центральной частоты фильтра  $f_0$ . Изготовление квазиеверных фильтров на ОФНП для более высоких частот сильно затруднено, так как требует слишком высокой разрешающей способности фотолитографического оборудования и более сложных технологических процессов. Напротив, реализация для более низких частот приводит к увеличению размеров чипа и, как следствие, увеличению расхода материалов и использованию металлокерамических DIP-корпусов, имеющих значительно большие массо-габаритные характеристики и являющихся менее технологичными, чем стандартные SMD-корпуса.

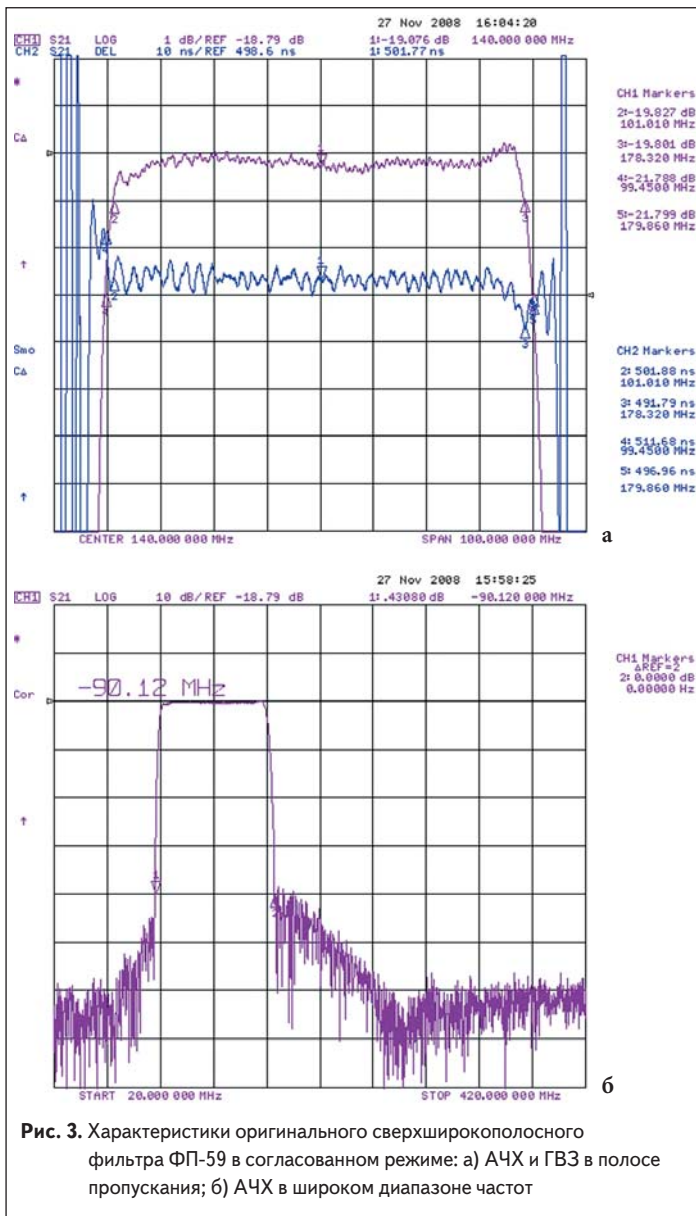


### Наши разработки и результаты

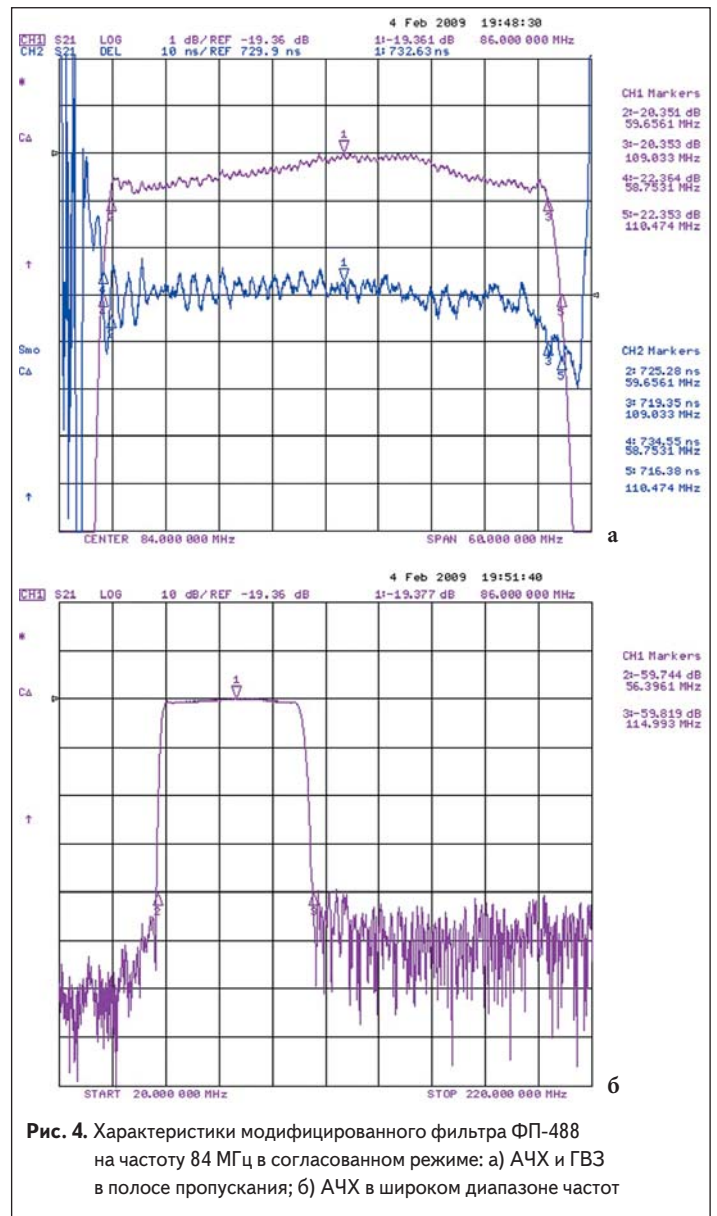
В последние годы (2006–2008) в техническом центре функциональной электроники ОАО «МНИИРС» была разработана и реализована целая линейка сверхширокополосных трансверсальных фильтров на ПАВ, в значительной степени удовлетворяющих вышеупомянутым требованиям. Все эти фильтры обладают сравнительно малыми потерями (<20 дБ), гарантированным затуханием в полосе заграждения ~40 дБ и более, а также обладают малыми пульсациями АЧХ (~0,5 дБ) и ГВЗ (~10 нс) в полосе пропускания. Для удобства и улучшенной температурной стабильности все фильтры выполнены на базе кристаллов ниобата лития среза 128°, помещенных в металлокерамические корпуса для поверхностного монтажа (SMD) стандартного типоразмера 13,3×6,5 мм и имеют одинаковое расположение выводов. Внешний вид квазиеверных фильтров на ОФНП в таких корпусах в открытом виде показан на рис. 2.

Частотные характеристики всех трех типов сверхширокополосных фильтров (ФП-59, ФП-488 и ФП-474), измеренные в согласованном режиме на анализаторе цепей Agilent 8753Е, представлены на рис. 3–5.

Добиться таких характеристик удалось благодаря применению упомянутых выше квазиеверных ОФНП с емкостным взвешиванием, позволяющих сочетать большое количество



**Рис. 3.** Характеристики оригинального сверхширокополосного фильтра ФП-59 в согласованном режиме: а) АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания; б) АЧХ в широком диапазоне частот



**Рис. 4.** Характеристики модифицированного фильтра ФП-488 на частоту 84 МГц в согласованном режиме: а) АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания; б) АЧХ в широком диапазоне частот

электродов преобразователя с широкой полосой пропускания фильтра, высокой избирательностью и относительно малыми потерями для фильтров этого класса. Для повышения технологичности в приведенных фильтрах ФП-59, ФП-474 и ФП-488 были использованы ОФНП типа TES (Three Electrode Section), так как они имеют минимальные электроды шириной  $\lambda/8$  (в отличие от некоторых ОФНП с электродами шириной  $\lambda/16$ , более сложными для воспроизводства).

Векторная фазовая диаграмма излучения и отражения, а также структура элементарной секции такого преобразователя приведены на рис. 6. ТС и РС — условные центры возбуждения и отражения ПАВ. Векторные диаграммы ОФНП излучаемой и отраженной волны рисунка рассчитывались по относительным фазовым положениям кромок электродов элементарной секции (рис. 7а, б).

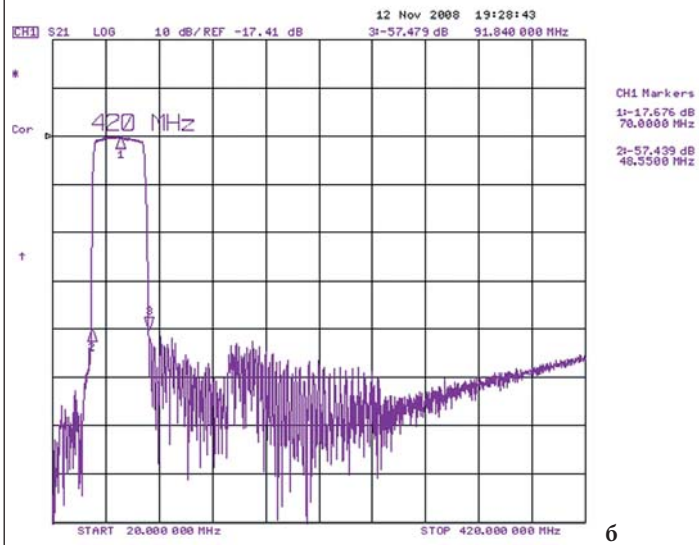
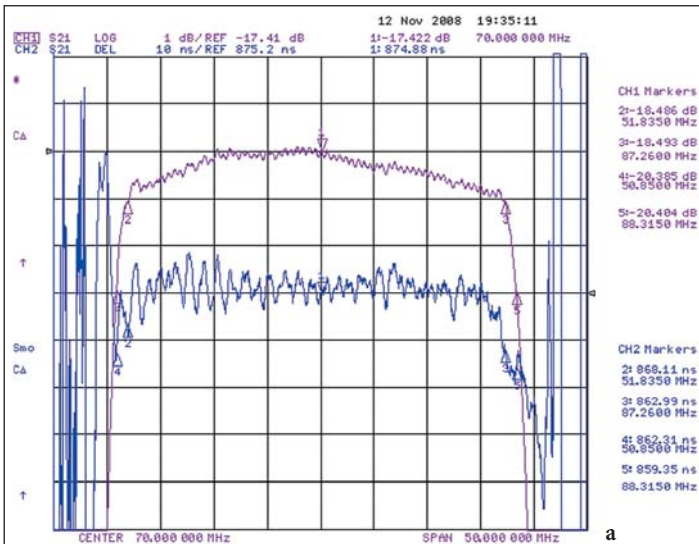
Комплексный вклад амплитуды каждой активной кромки рассчитывался по формуле  $A = \exp(i(\omega t + kx))$ , где  $k = \pm 1$  для прямой и отраженной волн,  $\omega$  — круговая частота,  $t$  — время, а  $x$  — координата кромки электрода. При

расчете фаз отраженной волны учитывались все кромки электродов, при расчете излученной — только активные. Учитывалось также, что при отражении от кромки фаза меняется на  $180^\circ$ . Далее проводился расчет суммарного

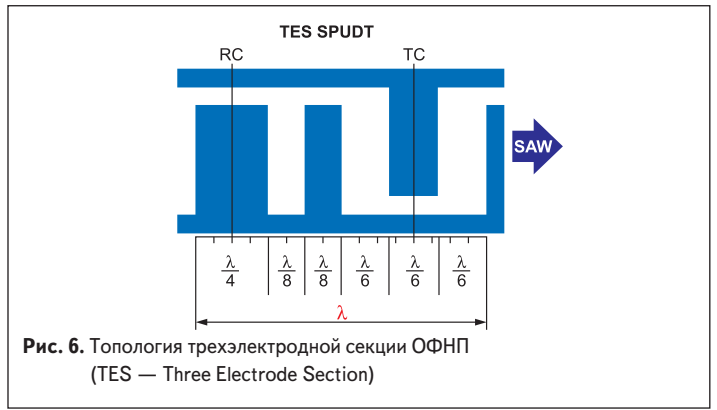
вектора как комплексной суммы векторов кромок и строилась их векторная диаграмма. Векторы кромок на диаграммах обозначены синим цветом, а их результирующий вектор — красным.

**Таблица 2.** Сравнение параметров ПАВ-фильтров ФП-59, ФП-474, ФП-488 и фильтра корейской компании SAWNICS-SL7040AD

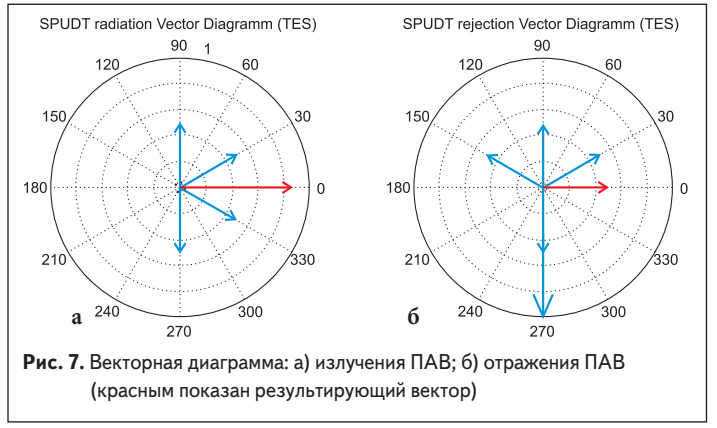
| Параметр   | Обозн. | ФП-474  | ФП-59   | ФП-488  | SL7040AD |
|--|--------|---------|---------|---------|----------|
| Центральная частота, МГц   | $f_0$  | 70      | 140     | 84      | 70       |
| Вносимые потери, Б   | IL     | 17,5    | 19,0    | 19,5    | 20,7     |
| Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц                                | BW1    | 34,8    | 76,5    | 47,4    | 39,7     |
| Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц                                | BW3    | 37,4    | 80,4    | 51,7    | 40,8     |
| Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц                               | BW40   | 43,1    | 90,0    | 58,5    | 46,8     |
| Неравномерность АЧХ в полосе частот 70% от BW3 ( $f_0 \pm 18$ МГц), дБ | AR     | 0,8     | 0,4     | 0,8     | 0,5      |
| Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70% от BW3 ( $f_0 \pm 18$ МГц), нс | GDV    | 12      | 7       | 10      | 18       |
| Время задержки, мкс  |        | 0,87    | 0,98    | 0,73    | 0,89     |
| Затухание в полосе заграждения, дБ                                     | UR     | 40      | 40      | 40      | 32       |
| Рабочая температура, °С  |        | -55/+85 | -55/+85 | -55/+85 | -30/+80  |
| Сопrotивления генератора и нагрузки, Ом                                | RS/RL  | 50/50   | 50/50   | 50/50   | 50/50    |
| Температурный коэффициент (128°-спрез LiNbO <sub>3</sub> ), ppm/°С     | TCD    | -76     | -76     | -76     | -72      |
| Относительная полоса пропускания по уровню -3 дБ, %                    | -      | 53,4    | 57,4    | 61,5    | 58,3     |



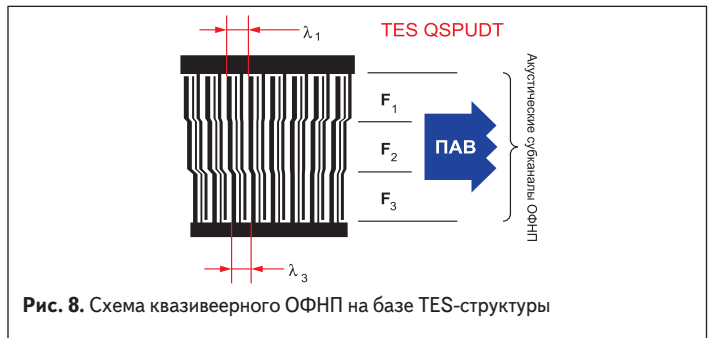
**Рис. 5.** Характеристики модифицированного фильтра ФП-474 на частоту 70 МГц в согласованном режиме: а) АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания; б) АЧХ в широком диапазоне частот



**Рис. 6.** Топология трехэлектродной секции ОФНП (TES — Three Electrode Section)



**Рис. 7.** Векторная диаграмма: а) излучения ПАВ; б) отражения ПАВ (красным показан результирующий вектор)



**Рис. 8.** Схема квазиевренного ОФНП на базе TES-структуры

Принципиальная схема квазиевренного ОФНП на базе TES-структуры приведена на рис. 8. На схеме показан принцип действия ОФНП с разделением на акустические субканалы с разными длинами волн, рассчитанными на ряд частот в полосе пропускания. Вместе они образуют единый фильтр, полоса пропускания которого может быть во много раз больше полосы отдельного субканала. Как уже было сказано ранее, такой подход позволил реализовать коэффициент прямоугольности, близкий к единице ( $K_{3/40} \sim 1,15$ ), и совместить очень широкую полосу пропускания ( $BW \sim 50\text{--}60\%$ ) с относительно малыми потерями. В таблице 2 приведены параметры разработанных сверхширокополосных фильтров ФП-59, ФП-474 и ФП-488 в согласованном с трактом 50-омном режиме. Следует отметить, что на начало 2009 г. немногие мировые фирмы занимались разработкой ПАВ-фильтров сверхширокополосного класса, а среди тех, кто их производил (Vectron, SAWTEK (США), Tai-Saw Technology (КНР), SAWNICS (КНДР) и др.), лишь единицы могли предложить ПАВ-фильтры с близкими характеристиками.

Преимуществами всех разработанных образцов по сравнению с зарубежными аналогами, безусловно, являются малые вносимые потери ( $IL < 20$  дБ), особо малые пульсации ГВЗ ( $GDV \sim 10$  нс) и коэффициент прямоугольности, близкий к единице ( $K_{3/40} \sim 1,15$ ). Все фильтры также продемонстрировали высокую избирательность ( $UR \sim 40\text{--}50$  дБ) в широком частотном диапазоне и пульсации АЧХ менее 1 дБ. Подводя итоги, нужно сказать, что такие параметры обуславливают применение сверхширокополосных фильтров ФП-59, ФП-474, ФП-488 и их семейства, разрабатываемого в настоящий момент, в различной прецизионной радиоэлектронной аппаратуре в области промежуточных частот и могут значительно увеличить ее потенциал. Автор выражает благодарность всем сотрудникам технического центра функциональной электроники (ТЦФЭ) ОАО «МНИИРС» за консультации по тематике и материалы по ПАВ-фильтрам, а также за предоставление технологической базы для проведения соответствующих экспериментов.

### Литература

1. Мэттьюс Г. (под ред.) Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология, применение. М.: Радио и связь, 1981.
2. Chvets V.B., Orlov V.S., Rusakov A.N. Development of Low-Loss SAW Filters Based on Quasi-Slanted SPUDTs. // IEEE 2000 Ultrasonics Symposium Proc., pp. 75-78.
3. Chvets V.B., Ivanov P.G., Makarov V.M., Orlov V.S. Low-Loss Slanted SAW Filters With Low Shape-Factor // IEEE 1999 Ultrasonics Symposium Proc.
4. Yatsuda H. Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers // IEEE Trans. on UFFC, Vol. 44, No. 2, March 1997.
5. Туркин И. А. Фильтры на ПАВ – ускоренные методы проектирования // Электроника НТБ 2008 №2.
6. Туркин И. А. Эффекты отражения от краев экранирующих шин в однонаправленных ВШП-фильтров на ПАВ // Нано- и микро-системная техника 2009 №2 (103).
7. <http://www.sawnics.com/pro/pro02.html>
8. <http://www.mniirs.org/mniirs/product/pav.php>