

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПАВ

Практически все современные коммуникационные устройства, от мобильного телефона и систем навигации ГЛОНАСС и GPS до систем аэрокосмической связи и радиолокации, используют различные частотно-избирательные устройства. Принцип действия большинства из них основан на акустоэлектронном взаимодействии анизотропной кристаллической решетки пьезоэлектрика и слоя сформированных на ней металлических электродов, возбуждающих под действием переменного электромагнитного поля поверхностную акустическую волну (ПАВ). Давно известно, что по сравнению с фильтрами, работающими на других физических принципах, ПАВ-фильтры обладают рядом преимуществ – малыми габаритами, возможностью установки в корпуса для поверхностного монтажа, высокой механической прочностью, температурной стабильностью, малыми вносимыми потерями и большим гарантированным затуханием в полосе заграждения (40–60 дБ).

Полосовые ПАВ-фильтры делятся на два типа: резонаторные и трансверсальные. Резонаторные фильтры имеют малые потери (около 3–10 дБ), узкую полосу пропускания (0,01–5%) и низкий уровень сигнала в полосе заграждения (порядка -50–60 дБ от основного сигнала). Трансверсальные фильтры демонстрируют несколько большие потери (около 7–25 дБ в зависимости от типа встречно-штырькового преобразователя (ВШП) и широкополосности), зато позволяют реализовать широкий диапазон полос пропускания (от 1 до 50 % и более), получить коэффициент прямоугольности, близкий к единице, а также малые пульсации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и величины группового времени задерживания (ГВЗ) в полосе пропускания. Оба типа фильтров имеют хорошую температурную стабильность, которая обусловлена типом используемых пьезокристаллов. В основном применяются такие пьезокристаллы, как ниобат лития (температурная стабильность -70–94 ppm/°C), танталат лития (-30 ppm/°C) или пьезокварц (-0,05 ppm/°C²). В зависимости от ширины полосы пропускания используется тот или иной

И.Туркин, stor007@bk.ru
С.Тимошенко, д.т.н., А.Краснопольский, д.т.н.

материал подложки: кварц для узкополосных фильтров, танталат лития – для среднеполосных и ниобат лития для широкополосных фильтров.

Наиболее востребованы трансверсальные фильтры на ПАВ отечественного производства в космических аппаратах, транспондерах и других приемо-передающих системах, в различных измерительных приборах, а также в качестве частотно-селективных устройств универсального назначения.

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

Потенциально этим требованиям в значительной степени могут соответствовать трансверсальные ПАВ-фильтры на базе квазивеврных однофазных однонаправленных преобразователей (КВОФНП, QSPUDT) на пьезокристаллах ниобата лития. Частотно-полосная область их эффективной и потенциальной реализации, классификация, используемые материалы, а также технологические возможности их изготовления показаны на рис.1 (приблизительно) и в табл.1.

Квазивеврные фильтры на ОФНП (QSPUDT) наиболее эффективны в диапазоне частот ~70–450 МГц и в пределах полос пропускания, равных ~7–65% от центральной частоты фильтра f_0 .

Изготовление квазивеврных фильтров на ОФНП на более высокие частоты затруднено, так как для этого требуются фотолитографическое оборудование с очень высокой разрешающей способностью и, как следствие, более сложные технологические процессы. Реализация на более низких частотах приводит к увеличению размеров чипа и, следовательно, к увеличению расхода материалов и использованию металлокерамических DIP-корпу-



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

Класс фильтров на ПАВ	BW3*	Типы фильтров	Пьезокристаллы
Сверхширокополосные	>40%	КВОФНП	Ниобат лития
Широкополосные	15–40%	ВШП с МПО**, КВОФНП	Ниобат лития
Среднеполосные	5–15%	ВШП с МПО, КВОФНП	Ниобат лития, танталат лития
Узкополосные	1–5%	Резонаторные, ВШП с МПО, КВОФНП	Танталат лития, кварц, лангасит

* BW3 (Bandwidth) – полоса пропускания по уровню -3 дБ от максимума.
 ** МПО – многополосковые ответвители.

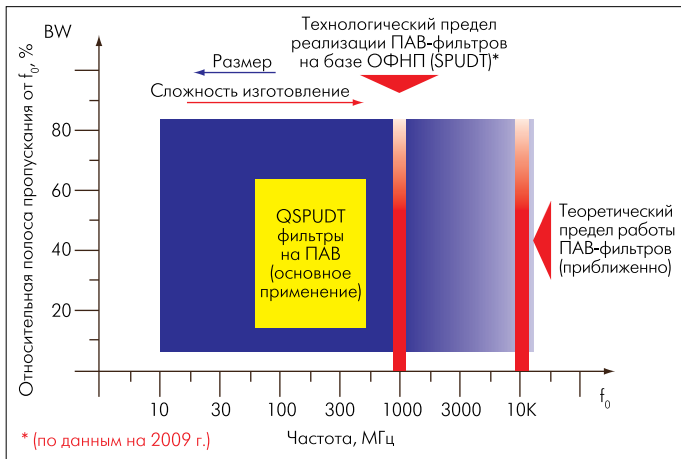


Рис. 1. Частотно-полосная область реализации ПАВ-фильтров на базе КВОФНП (QSPUDT) и технологический предел их изготовления

сов, которые имеют большие габариты, массу и менее технологичны, чем стандартные SMD-корпуса.

В 2006–2008 годах в техническом центре функциональной электроники ОАО "МНИИРС" была разработана и реализована 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 малыми пульсациями АЧХ (~0,5 дБ) и ГВЗ (~10 нс) в полосе пропускания. Для удобства все фильтры выполняются на базе кристаллов ниобата лития среза 128°, которые помещаются в металлокерамические корпуса для поверхностного монтажа (SMD) стандартного типоразмера 13,3×6,5 мм и имеют одинаковое расположение выводов.

Были разработаны сверхширокополосные фильтры ФП-59*, ФП-488 и ФП-474. Частотные характеристики фильтров ФП-488 и ФП-474, измеренные в согласованном режиме на анализаторе цепей Agilent 8753E, приведены рис.2 и 3.

Добиться таких характеристик удалось благодаря применению упомянутых выше КВОФНП с емкостным взвешиванием, которые позволяют сочетать большое число электродов преобразователя с широкой полосой пропускания фильтра, высокой

* Туркин И. Фильтры на ПАВ – ускоренные методы проектирования. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, вып. 2, с. 92–97.

избирательностью и относительно малыми потерями для фильтров этого класса. В фильтрах ФП-59, ФП-474 и ФП-488 используются ОФНП типа TES (Three Electrode Section). Это повышает технологичность, так как они имеют минимальные электроды

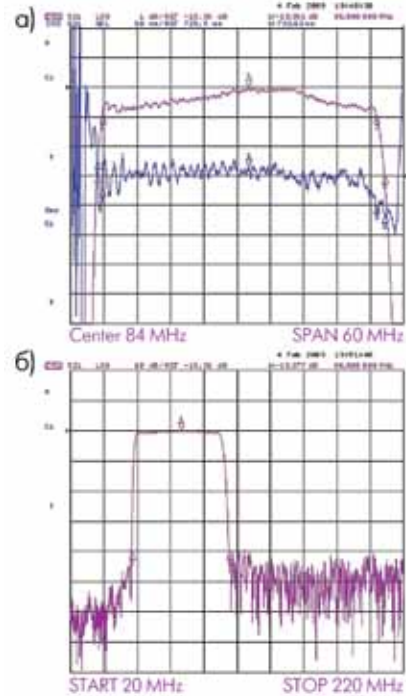


Рис.2. Характеристики фильтра ФП-488 на частоту 84 МГц в согласованном режиме: а – АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания; б – АЧХ в широком диапазоне частот

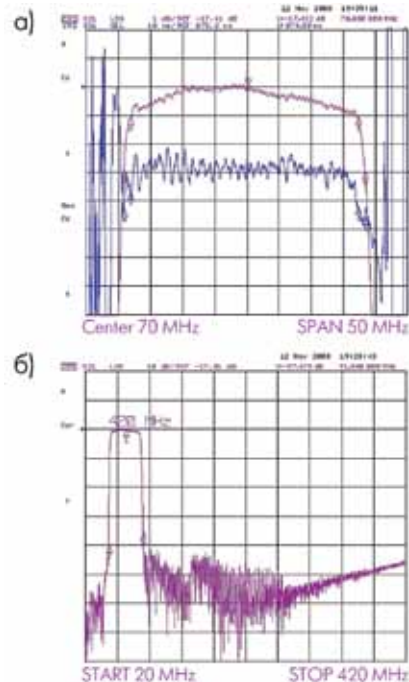


Рис.3. Характеристики фильтра ФП-474 на частоту 70 МГц в согласованном режиме: а – АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания; б – АЧХ в широком диапазоне частот

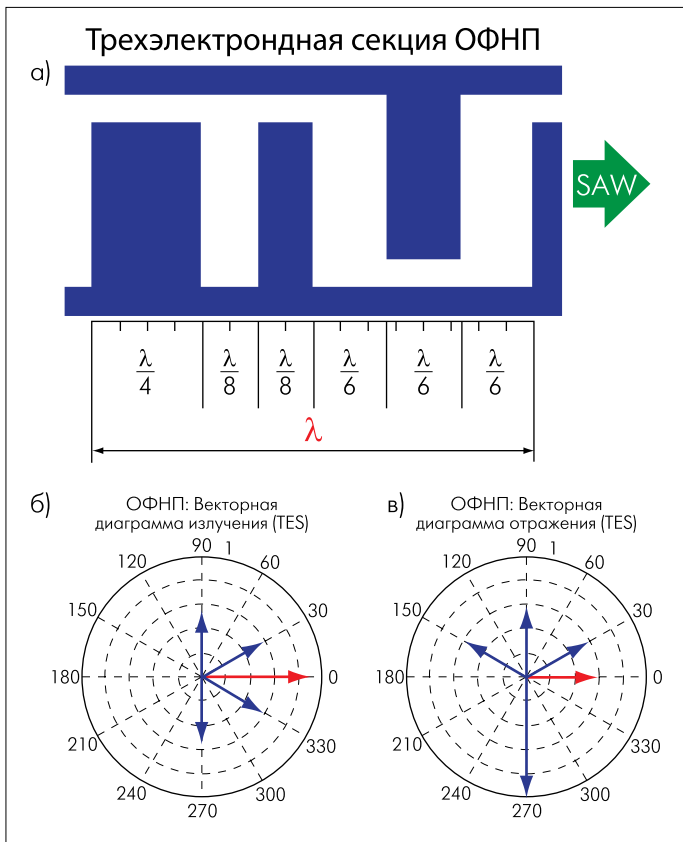


Рис.4. Топология трехэлектродной секции ОФНП типа TES (а); векторная диаграмма излучения ПАВ (б); векторная диаграмма отражения ПАВ (красным показан результирующий вектор) (в)

шириной $\lambda/8$ (в отличие от 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.4. ТС и РС на рис.4а – условные центры возбуждения и отражения ПАВ. Векторные диаграммы ОФНП излучаемой и отраженной волны рассчитывались по относительным фазовым положениям кромок электродов элементарной секции и показаны на рис.4б, в.

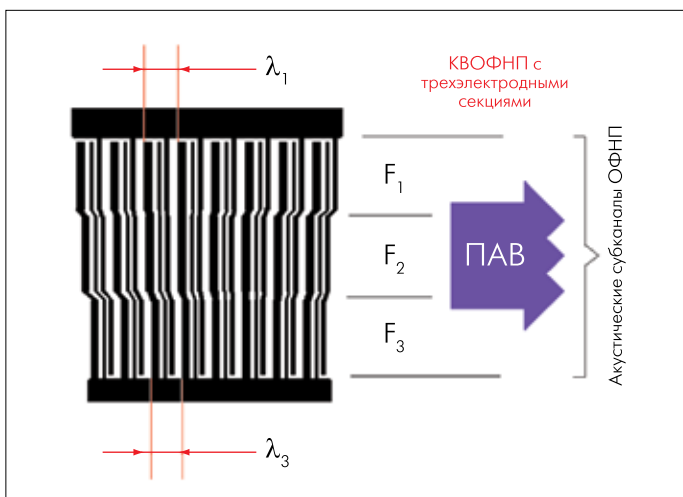


Рис.5. Принципиальная схема КВОФНП (QSPUDT) с трехэлектродными секциями (TES)

Комплексный вклад амплитуды каждой активной кромки рассчитывался по формуле $A = \exp(i(\omega t + kx))$, где $k = \pm 1$ для прямой и отраженной волн, ω – круговая частота, t – время, 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° . Затем вычислялся суммарный вектор как комплексная сумма векторов кромок и строилась их векторная диаграмма. Векторы кромок на диаграммах обозначены синим цветом, а их результирующий вектор – красным.

Принципиальная схема КВОФНП на базе такой TES-структуры приведена на рис.5.

На том же рисунке 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, такой подход позволил реализовать коэффициент прямоугольности, близкий к единице ($K3/40 \sim 1,15$) и совместить очень широкую полосу пропускания ($BW \sim 50-60\%$) с относительно малыми потерями.

Параметры всех трех разработанных сверхширокополосных фильтров ФП-59, ФП-474 и ФП-488, а также параметры фильтра производства корейской компании SAWNICS (для сравнения) в согласованном с 50-Ом трактом режиме приведены в табл.2.

Следует отметить, что сегодня не так много фирм производят фильтры на ПАВ сверхширокополосного класса, а сре-

Таблица 2. Параметры ПАВ-фильтров ФП-59, ФП-474, ФП-488 и фильтра SL7040AD (SAWNICS, Корея)

Параметр	ФП-474	ФП-59	ФП-488	SL7040AD
Центральная частота, F0, МГц	70	140	84	70
Вносимые потери, IL, дБ	17,5	19,0	19,5	20,7
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, BW1, МГц	34,8	76,5	47,4	39,7
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, BW3, МГц	37,4	80,4	51,7	40,8
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, BW40, МГц	43,1	90,0	58,5	46,8
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70% от BW3 (F0 ± 18 МГц), AR, дБ	0,8	0,4	0,8	0,5
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70% от BW3 (F0 ± 18 МГц), GDV, нс	12	7	10	18
Время задержки, мкс	0,87	0,98	0,73	0,89
Затухание в полосе заграждения, UR, дБ	40	40	40	32
Рабочая температура, °С	-55...85	-55...85	-55...85	-30...80
Сопровождающие сопротивления генератора и нагрузки, RS/RL, Ом	50/50	50/50	50/50	50/50
Температурный коэффициент (128°-срез LiNbO3), TCD, ppm/°C	-76	-76	-76	-72
Относительная полоса пропускания по уровню -3 дБ, %	53,4	57,4	61,5	58,3



ди тех, которые производят (Vectron, Sawtek (США), Tai-Saw Technology (КНР), Sawmics (КНДР)) лишь единицы могут предложить ПАВ-фильтры с близкими характеристиками.

Наиболее высокими параметрами по сравнению с зарубежными аналогами, которые продемонстрировали все разработанные образцы, являются, безусловно, малые вносимые потери ($IL < 20$ дБ), очень малые пульсации ГВЗ (GDV ~ 10 нс) и коэффициент прямоугольности, близкий к единице ($K3/40 \sim 1,15$). Все фильтры также имеют высокую избирательность ($UR \sim 40-50$ дБ) в широком частотном диапазоне и пульсации АЧХ менее 1 дБ. Для сравнения в табл.2 приведены параметры сверхширокополосного фильтра SL7040AD корейской компании Sawmics – одного из мировых лидеров по производству ПАВ-компонентов.

Подводя итог, нужно сказать, что полученные параметры делают эффективным 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, предоставление материалов по фильтрам на ПАВ и технологической базы для проведения соответствующих экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология, применение / Под ред. Г.Мэттьюз. – М.: Радио и связь, 1981. – 472 с.
- 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.
- 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., pp.51–54.
- Yatsuda H.** Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers. – IEEE Trans. on UFFC, vol. 44, No. 2, March 1997.
- Данилов А.Л., Иванов П.Г., Макаров В.М., Орлов В.С., Швец В.Б.** Фильтр на поверхностных акустических волнах с квазивеерными преобразователями. Патент РФ № 2171010 С2.
- Туркин И.А.** Фильтры на ПАВ – ускоренные методы проектирования. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, № 2, с. 92–97.
- Туркин И.А.** Эффекты отражения от краев экранирующих шин в однонаправленных ВШП фильтров на ПАВ. – Нано- и микросистемная техника, 2009, № 2. <http://www.sawmics.com/pro/pro02.html>. <http://www.mniirs.org/mniirs/product/pav.php>.