

# Влияние эффектов отражения на АЧХ фильтров на ПАВ

В статье рассказывается об эффекте частичного отражения ПАВ от краёв экранирующих шин ОНВШП, а также приведены рекомендации по уменьшению негативного влияния этого эффекта на АЧХ и ГВЗ фильтров на ПАВ в полосе пропускания. Эффект исследовался на квази-вверном фильтре ФП-474 (70В38v1 D), однако он может наблюдаться в целом ряде фильтров на ПАВ, имеющих сходные топологические особенности.

Илья Туркин  
stor007@bk.ru

## Введение

Полосовые фильтры на ПАВ являются одними из наиболее используемых в современных системах связи и устройствах беспроводной передачи данных в силу их миниатюрности, надежности, термостабильности и возможности реализации сложных частотных характеристик. Другим важнейшим достоинством трансверсальных фильтров на ПАВ является то, что они сочетают в себе сразу три устройства — аттенюатор, полосовой фильтр и линию задержки, что в ряде случаев может с успехом применяться в различной аппаратуре.

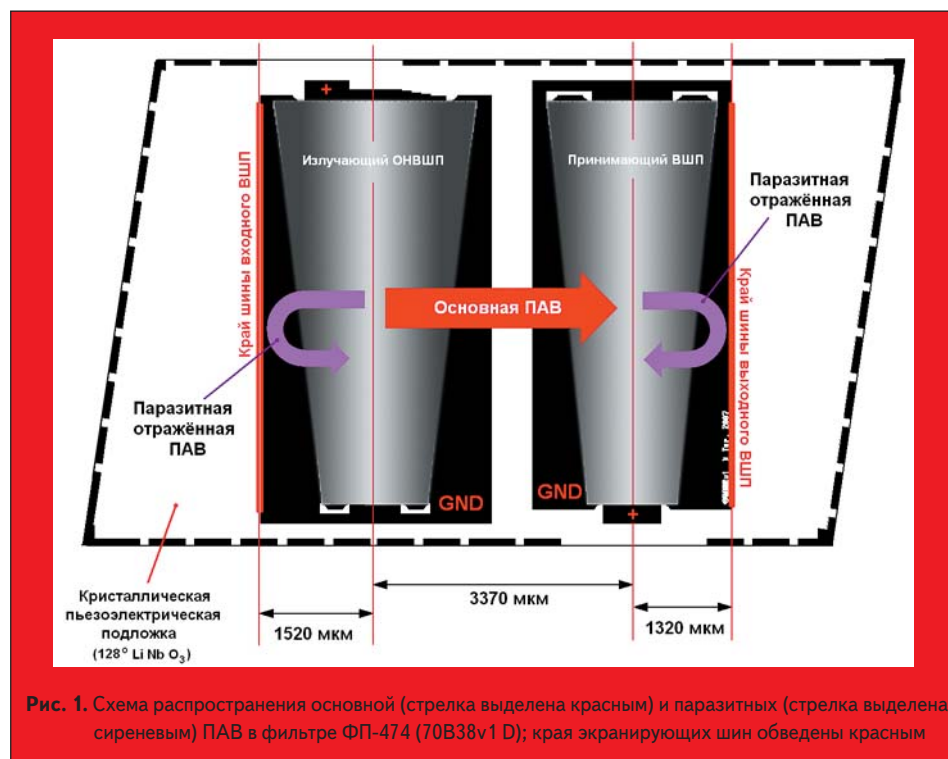
Неравномерность АЧХ и пульсации ГВЗ в полосе пропускания являются одними

из наиболее важных показателей полосового фильтра на ПАВ наряду с такими как вносимые потери, избирательность и коэффициент прямоугольности. Создание трансверсального фильтра на ПАВ с малыми пульсациями АЧХ и ГВЗ, хорошей избирательностью и малыми вносимыми потерями всегда было и остается одной из приоритетных задач ПАВ-технологии, поставленных современной электроникой [1,2].

Эффект отражения ПАВ от торцов кристалла известен давно. Принципиально он заключается в частичном переотражении ПАВ, излученной ВШП, в обратном направлении, от края кристалла. Существуют различные методы борьбы с этим эффектом, среди

### Список использованных сокращений:

**ПАВ** — поверхностная акустическая волна  
**АЧХ** — амплитудно-частотная характеристика  
**ГВЗ** — групповое время запаздывания  
**ИХ** — импульсная характеристика  
**ВШП** — встречно-штыревой преобразователь  
**ОНВШП** — однонаправленный встречно-штыревой преобразователь  
**ЭОК** — эффект отражения от краев шин  
**ЭМ** — электромагнитный  
**SMD** (Surface Montage Device) — устройство для поверхностного монтажа



которых такие как грубая обработка торцов, нанесение на них поглощающих акустические волны материалов, изготовление чипов в форме параллелограмма для изменения направления вектора распространения переотраженной волны, а также некоторые другие.

Однако данный эффект является отнюдь не единственной причиной, вносящей дополнительные искажения в характеристики фильтров на ПАВ, в том числе современных квази-веерных фильтров на базе однонаправленных встречно-штыревых преобразователей (ОНВШП) [3,4].

Недавно опытным путем было исследовано негативное влияние эффекта отражения ПАВ от краев экранирующих шин ОНВШП на частотные характеристики фильтров этого типа (на базе ОНВШП) в полосе пропускания.

Суть эффекта состоит в том, что при генерации ПАВ излучающим ОНВШП, несмотря на направленность преобразователя, некоторая часть ПАВ все же генерируется в обратном направлении (рис. 1).

Достигая края шины ВШП, волна частично снова отражается и начинает распространяться вдоль основного направления, но с дополнительной задержкой, равной времени, которое необходимо ПАВ на преодоление этого дополнительного расстояния. Обратный эффект наблюдается, когда ПАВ достигает условного центра приемного ВШП: некоторая часть волны сразу не преобразуется в ЭМ-сигнал, а продолжает распространяться. Достигнув шины преобразователя, часть ПАВ также отражается по направлению к центру выходного преобразователя, где основная ее часть преобразуется в ЭМ-сигнал тоже с некоторой дополнительной задержкой. Так как в реальности мы имеем дело не с отдельным бесконечно малым импульсом сигнала, а с непрерывной генерацией ПАВ, то эти отраженные волны векторно суммируются с основными, что вносит дополнительные фазовые искажения.

Характер этих искажений, а тем более их количественное влияние, предсказать довольно сложно из-за некоторой неоднородности ско-

Таблица. Влияние ЭОК на характеристики фильтров

Влияние ЭОК →	Присутствует				Подавлено			
Параметр ↓/Фильтр →	ФП-59	ФП-473	ФП-474	ФП-483	ФП-59	ФП-473	ФП-474	ФП-483
Центральная частота $f_0$ , МГц	140	70	70	37	140	70	70	37
Вносимые потери, дБ	22,5	17,7	18,9	23	22,5	17,7	18,9	23
Полоса пропускания по уровню -1 дБ, МГц	76,5	27,1	34,8	21,8	76,5	27,1	34,8	21,8
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	79,6	28,4	37,4	22,5	79,6	28,4	37,4	22,5
Полоса пропускания по уровню -40 дБ, МГц	90	33	43,1	25,4	90	33	43,1	25,4
Неравномерность АЧХ в полосе частот 70 % от BW3, дБ	0,8	0,9	0,9	0,8	0,4	0,5	0,6	0,4
Неравномерность ГВЗ в полосе частот 70 % от BW3, нс	12	30	35	70	7	10	12	30
Затухание в полосе заграждения, дБ	40	45	40	40	40	45	40	40
Температурный коэффициент, $\text{млн}^{-1}/^{\circ}\text{C}$	76	90	76	76	76	90	76	76
Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	-55...+85							

рости ПАВ на частично металлизированной пьезоэлектрической подложке, а также из-за набегающей фазовой неоднородности ПАВ в квази-веерных ОНВШП в силу различия периодов электродов.

Для изучения этого вопроса был проведен эксперимент с широкополосным фильтром ФП-474 на 70 МГц, в ходе которого были измерены его АЧХ, ИХ и ГВЗ. На снятой ИХ были обнаружены два аномальных пика, приблизительно соответствующих удвоенному времени запаздывания с некоторым отклонением в обе стороны и находящимся на уровне -35 дБ от пика основного сигнала (рис. 26). Для выяснения причин их возникновения было проведено сопоставление времен задержки этих пиков с основными расстояниями на структуре ВШП и средней скоростью распространения ПАВ на металлизированной поверхности в данном срезе ( $128^{\circ}\text{LiNbO}_3$ ), составляющей приблизительно  $\sim 3850$  м/с. Расстояние между центрами ОНВШП структуры составляло  $\sim 3370$  мкм, расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин составляли  $\sim 1520$  мкм и  $\sim 1320$  мкм соответственно (рис. 1).

Если принять во внимание расстояния между центрами ОНВШП структуры и расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин, то, учитывая реальную скорость распространения ПАВ, можно рассчитать дополнительное время запаздывания ПАВ, отражающейся от краев шин (рис. 1).

Зная значение скорости ПАВ в кристалле ( $\sim 3850$  м/с для металлизированной поверхности и  $\sim 3980$  м/с для свободной поверхности в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  среза  $128^{\circ}$ ) и расстояния от центра 1-го и 2-го ВШП до их краев шин можно рассчитать дополнительное время запаздывания отраженных ПАВ:  $(1520 \text{ мкм}/3850 \text{ м/с}) \times 2 = 0,790$  мкс для 1-го и  $(1320 \text{ мкм}/3850 \text{ м/с}) \times 2 = 0,686$  мкс для 2-го ВШП соответственно (коэффициент 2 обусловлен тем, что волна проходит в прямом и обратном направлении — рис. 1).

Прибавив эти значения дополнительного времени запаздывания к среднему ГВЗ ( $\sim 0,877$  мкс) и сопоставив полученные значения со значениями пиков (обведены синим) на реальной ИХ ФП-474 (70В38v1 D) на рис. 26, можно наблюдать очень близкое их соответствие, что подтверждает справедливость вышеиз-

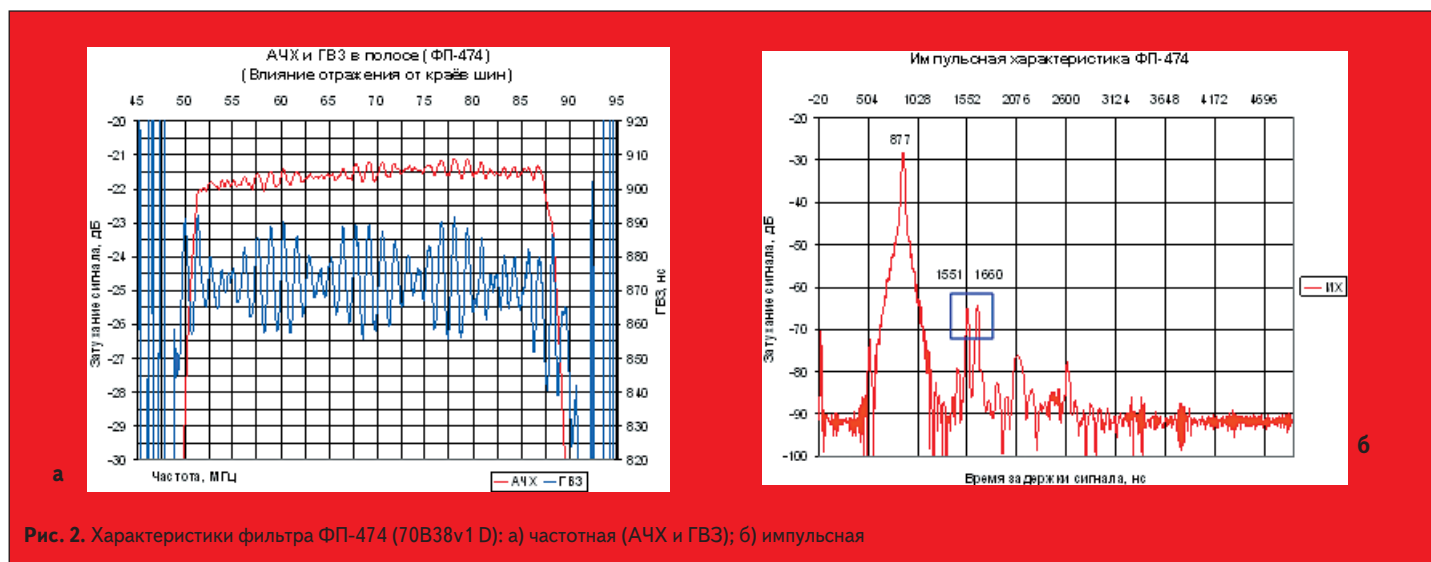


Рис. 2. Характеристики фильтра ФП-474 (70В38v1 D): а) частотная (АЧХ и ГВЗ); б) импульсная



Рис. 3. Схема распространения основной и поглощения паразитных ПАВ (фото фильтра ФП-474 70В38v1 D в корпусе DIP 151.15-8 19,5×14,5 мм с нанесенным акустопоглотителем)

ложенного. Таким образом, характеристики фильтра, представленные на рис. 2, включают в себя влияние эффекта отражения ПАВ от краев экранирующих шин.

Как известно, основными механизмами отражения ПАВ от металлических электродов являются закорачивание электрического поля ПАВ металлической пленкой и накопление реактивной энергии под электродами. Очевидно, что для устранения влияния отраженной ПАВ на характеристику необходимо каким-либо способом устранить появление отраженной ПАВ или погасить ее энергию еще до отражения.

Устранить ее появление можно, избавившись от экранирующей шины на стадии разработки топологии, но это, в свою очередь, может изменить другие характеристики фильтра, а в данном конкретном случае

не представляется возможным в силу того, что фильтр уже изготовлен. Однако можно в известной степени погасить отраженную волну, если нанести акустопоглощающий материал не только на торцы кристалла, но и непосредственно на экранирующую шину, не затрагивая активной части топологии ВШП, как показано на рис. 3.

В качестве акустопоглощающих материалов обычно используются различные кремнийорганические соединения типа эластосилов или эпоксидные смолы с добавлением тяжелых оксидов для увеличения плотности (эффективность акустического поглощения увеличивается при приближении плотности акустопоглощающего материала к плотности кристалла).

Упомянутая выше операция и была проделана с фильтром ФП-474 (70В38v1 D), после

чего были проведены повторные измерения его импульсной и частотных характеристик в согласованном режиме (рис. 4).

Из характеристик на рис. 4 видно, что паразитные пики на ИХ уменьшили свою интенсивность почти на 20 дБ по сравнению с первым случаем и практически сливаются с шумовым фоном. Также можно наблюдать уменьшение пульсаций АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания в 2 раза и более, что, очевидно, является следствием отсутствия влияния описанных выше паразитных ПАВ, отражающихся от краев экранирующих шин.

Влияние отраженных паразитных ПАВ на пульсации АЧХ и ГВЗ в полосе пропускания оказалось весьма значительным, и его устранение в данном случае позволило получить качественно новый полосовой фильтр, применение которого возможно в уже гораздо более требовательных к этим параметрам радиоэлектронных и навигационных системах. Следует добавить, что с помощью описанного способа удалось эффективно уменьшить пульсации АЧХ и неравномерность ГВЗ в полосе пропускания у целого ряда широкополосных квазиузких фильтров на ПАВ на базе ОНВШП, среди которых ФП-59 (рис. 5 справа), ФП-483, ФП-473 (рис. 5 слева) и ФП-474.

Все перечисленные фильтры представляют собой последние разработки технического центра функциональной электроники ОАО «МНИИРС» (3 последних разработаны автором) и по многим своим показателям на данный момент превосходят аналоги таких знаменитых зарубежных фирм как SAWTEK, TAI-SAW TECHNOLOGY и некоторых других.

Наиболее типичные показатели образцов этих фильтров, измеренные до и после минимизации акустопоглотителем эффекта отражения ПАВ от краев шин (ЭОК) приведены в таблице.

Во всех этих фильтрах посредством нанесения акустопоглотителя пульсации АЧХ и неравномерность ГВЗ в полосе пропускания были уменьшены приблизительно в 1,5–2 и 2–3 раза соответственно, что является значительным их качественным улучшением и расширяет спектр их применения.

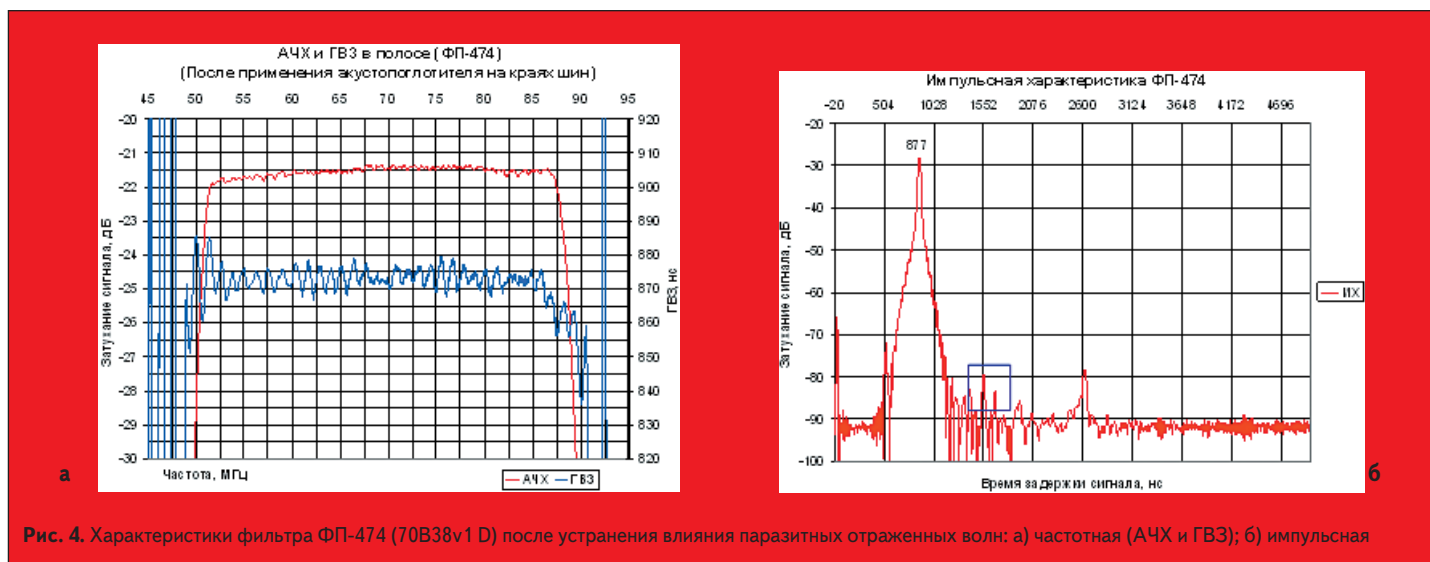
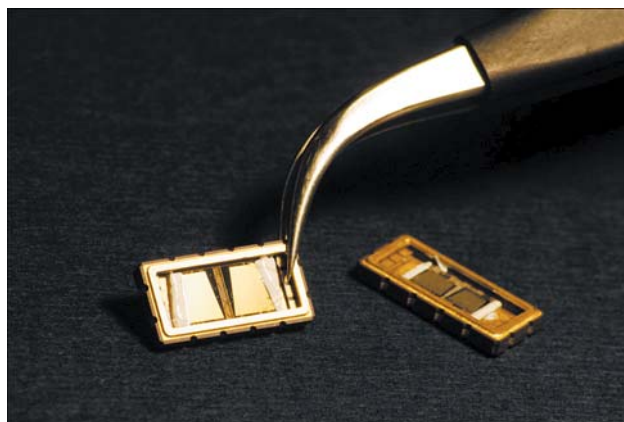


Рис. 4. Характеристики фильтра ФП-474 (70В38v1 D) после устранения влияния паразитных отраженных волн: а) частотная (АЧХ и ГВЗ); б) импульсная



**Рис. 5.** Фото квазиверных фильтров на ПАВ на базе ОНВШП фильтров в металло-керамическом SMD-корпусе 13,3×6,5 мм (не закрытые)

### Заключение

В ходе исследований частотных характеристик многих фильтров на базе квази-верных ОНВШП было выявлено и качественно оценено влияние эффекта отражения ПАВ от внешних краев экранирующих шин

на пульсации частотных характеристик в полосе пропускания. Был также найден эффективный метод минимизации этого негативного влияния. Исключение этого эффекта позволяет значительно уменьшить неравномерность частотных характеристик

(АЧХ и ГВЗ) в полосе пропускания и тем самым вывести многие фильтры на ПАВ со сходными топологическими особенностями на качественно новый уровень, что может существенно расширить область их применения.

Автор выражает благодарность сотрудникам технического центра функциональной электроники ОАО «МНИИРС» за предоставленные материалы по фильтрам на ПАВ, а также исследовательской и технологической базы для проведения соответствующих экспериментов. ■

### Литература

1. Туркин И. Фильтры на ПАВ — ускоренные методы проектирования // Электроника НТБ. 2008. № 2.
2. Фильтры на поверхностных акустических волнах / Под ред. Г. Мэтьюза. М.: «Радио и связь». 1981.
3. Yatsuda H.. Design Technique for SAW Filters Using Slanted Finger Interdigital Transducers. IEEE Trans. on UFFC, Vol. 44, No. 2, March 1997.
4. Brown R. B., Gopani S. Apodized Single-phase Unidirectional Transducer SAW Devices // in Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1991.