УДК 534.232.082.73

УСТРОЙСТВА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ОАО «НПП «ПОЛЕТ»: РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ПРИМЕНЕНИЕ

Ф. Ф. Яковлев, начальник отдела ОАО «НПП «Полет», к.т.н.; f.jackovlev@yandex.ru
В. А. Белоусов, начальник отделения ОАО «НПП «Полет»; bevlan44@mail.ru
В. Б. Новожилова, инженер-технолог 1-й категории ОАО «НПП «Полет»
Л. И. Шейкова, инженер-технолог 1-й категории ОАО «НПП «Полет»

Рассмотрены конструктивные и технологические особенности разработанных и выпускаемых ОАО «НПП «Полет» фильтров на ПАВ. Представлены фильтры сверхузкополосные, узкополосные и среднеполосные на пьезокварце, танталате лития и ниобате лития с рабочими частотами от 40 до 1000 МГц. Типы фильтров: резонаторные на поперечных связях и продольных модах, трансверсальные и импедансные. Приведены основные характеристики фильтров, описан технологический процесс их изготовления.

***Ключевые слова**: поверхностные акустические волны, фильтры, пьезоматериалы.*

Введение. В настоящее время устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) играют важную роль в развитии акустоэлектроники как направления в области твердотельной электроники и радиоэлектронных компонентов. Что касается фильтров на ПАВ, то среди всех акустоэлектронных устройств они продолжают занимать господствующее положение на рынке компонентов для систем и аппаратуры передачи и обработки информации [1].

Первые разработки устройств на ПАВ. Поскольку устройства на ПАВ обладают целым рядом преимуществ по сравнению с устройствами на традиционной элементной базе (малые вносимые потери, высокая стабильность электрических характеристик в широком диапазоне температур, небольшие габариты и масса и т.п.), в ОАО «НПП «Полет» с начала 90-х годов начались исследования и разработка устройств на ПАВ. В этот период возникла задача создания устройств для формирования и согласованной обработки сложных сигналов, высокостабильного генератора с перестройкой частоты и фильтра предварительной селекции сигнала с высокой крутизной скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для первых авиационных терминалов ОСНОД. Уже в 1995 г. был поставлен базовый технологический процесс изготовления этих устройств.

Актуальность проведения таких работ основывалась на уникальных свойствах ПАВ [2]:

- сравнительная простота возбуждения и приема их в пьезоэлектрических материалах, а также планарная технология изготовления, позволяющая доступ к любой области ПАВ-структуры для отвода и обработки сигнала;
- низкая по сравнению с электромагнитными волнами скорость распространения (3000—4000 м/с), открывающая перспективы микроминиатюризации, малое вносимое затухание вплоть до сверхвысоких частот;
- возможность использования разработанных ранее для полупроводниковых приборов групповых методов и технологий изготовления.

Ряд важных характеристик устройств на ПАВ (сверхузкая и сверхширокая полоса пропускания, коэффициент прямоугольности, уникальные массогабаритные характеристики) не могут быть реализованы на традиционной элементной базе.

В качестве первых устройств на ПАВ были разработаны: формирователь минимально-частотного манипулированного (МЧМ) сигнала, линия задержки программируемая многоотводная (ЛЗПМ) и генератор высокостабильного сигнала. Формирователь состоял из фазового коммутатора и устройства на ПАВ, преобразующего фазокодоманипулированный сигнал в МЧМ-сигнал. ЛЗПМ использовалась в режиме двойной длины, что давало возможность формировать на выходе корреляционный отклик, соответствующий 32-элементному коду.

В генераторе применялась линия задержки на ПАВ. Достоинство генератора — широкий диапазон перестройки для высокостабильных генераторов, низкий уровень фазовых шумов. На рис. 1 представлены: *1* — ЛЗПМ; *2* — генератор на ПАВ; *3* — формирователь МЧМ-сигнала.

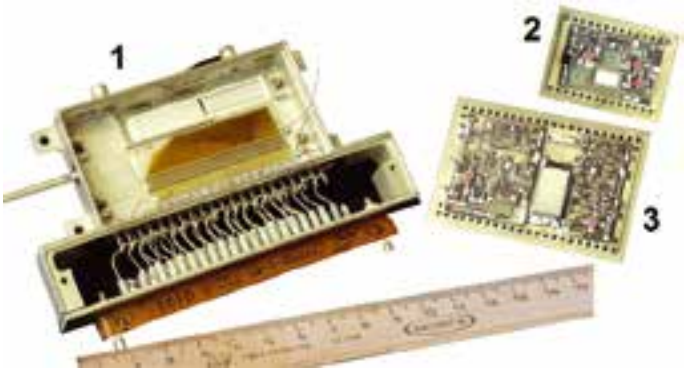

Рис. 1

Устройства в течение ряда лет успешно использовались в авиационных терминалах ОСНОД, однако с развитием и внедрением цифровой обработки сигнала они утратили свою актуальность. Дальнейшее развитие технологии изготовления устройств на ПАВ было направлено на разработку и выпуск фильтров различных типов и назначения.

Полосовые фильтры и технологии их изготовления. Технологические операции изготовления фильтров на ПАВ в основном используют технологию изготовления гибридных интегральных схем (ГИС). Однако применение пьезоэлектрических материалов (пьезокварца, ниобата лития, танталата лития и др.) вместо обычных керамических (по-

ликора, ситалла и т.п.), а также специфика устройств на ПАВ поставили ряд дополнительных требований к известным технологическим процессам. Так, устройства на ПАВ требуют более высокой разрешающей способности при изготовлении элементов на больших площадях (по сложности — на уровне полупроводникового производства), а именно:

- количество элементов встречно-штыревой ПАВ-структуры может достигать 5000 шт. на площади примерно 1×2,5 см^2;
- минимальная дефектность ПАВ-структур (количество разрывов штырей составляет не более 0,5% от общего количества штырей при наличии отдельных бездефектных секций до 200 штырей; замыкания недопустимы);
- высокое значение аспектного соотношения длины штыря ПАВ-структур к его ширине (или зазору между штырями) — до 3200. В полупроводниковой технологии при изготовлении СВЧ малошумящих транзисторов максимальное аспектное соотношение ~1000;
- отклонение соотношения ширины штырей и зазоров от заданного — не более 10%;
- допустимый разброс толщины металлизации по пластине — не более 2%; В технологии ГИС допустимые разбросы для проводящей металлизации — до 20%.

Выполнение жестких требований к формированию топологического рисунка ПАВ-структур обеспечивает минимальные вносимые потери, точность реализации центральной частоты до сотых долей процента, малое значение коэффициента прямоугольности (менее 2).

Изготовление ПАВ-структур для фильтров проводится методами прямой и обратной («взрывной») фотолитографии. Схемы этих техпроцессов представлены на рис. 2: I — прямая фотолитография; II — обратная фотолитография; III — обратная фотолитография с ионным локальным травлением канавок в кварце. Метод прямой фотолитографии используется для изготовления структуры с минимальными размерами элементов более 3 мкм. Структуры с размерами элементов меньше 3 мкм изготавливаются методом обратной фотолитографии. Техпроцесс обратной фотолитографии с локальным прецизионным травлением канавок в пьезокварце применяется для уменьшения межэлектродных паразитных отражений в трансверсальных фильтрах. Этот техпроцесс наиболее сложен и превосходит по сложности полупроводниковое производство.

Типы выпускаемых фильтров. На основе разработанных базовых технологических процессов на предприятии производится выпуск среднеполосных, узкополосных и сверхузкополосных фильтров на ПАВ.

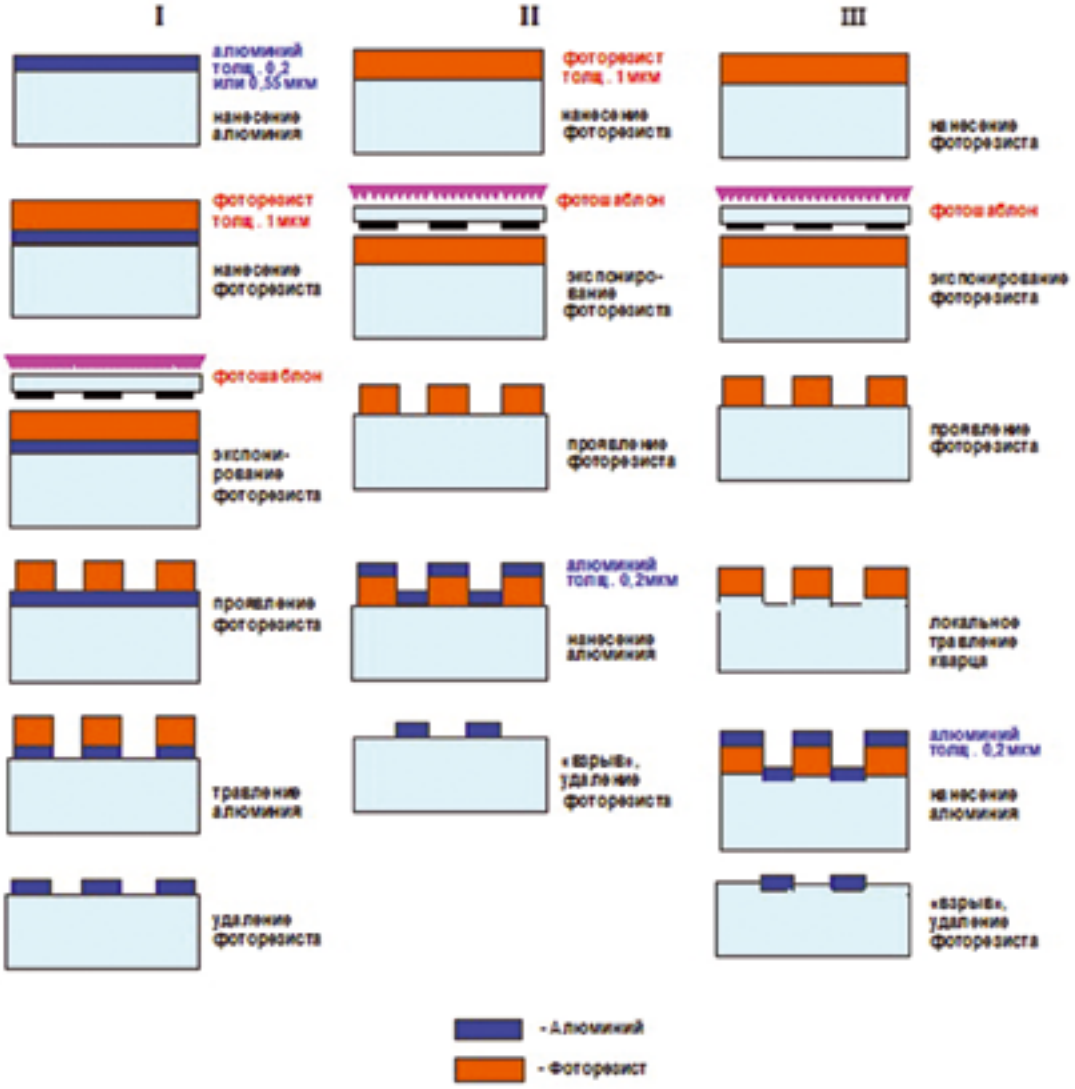

Рис. 2

Для создания среднеполосных и узкополосных фильтров используются оба метода обратной фотолитографии: с травлением канавок в пьезокварце (трансверсальные фильтры) и без канавок (резонаторные фильтры на продольных модах на танталате лития). Технологические возможности предприятия позволяют изготавливать фильтры с рабочими частотами от 40 до 700 МГц с полосами пропускания (0,8—10,0)%. Вносимые потери от 2,5 (резонаторные фильтры) до 7,0 дБ (трансверсальные), гарантированное затухание 40—50 дБ.

Типичные образцы фильтров этой группы представлены на рис. 3: *1* — среднеполосный импедансный фильтр на 1005 МГц; *2* — среднеполосный резонаторный на продольных модах на 276 МГц; *3* — узкополосный трансверсальный на 280 МГц.

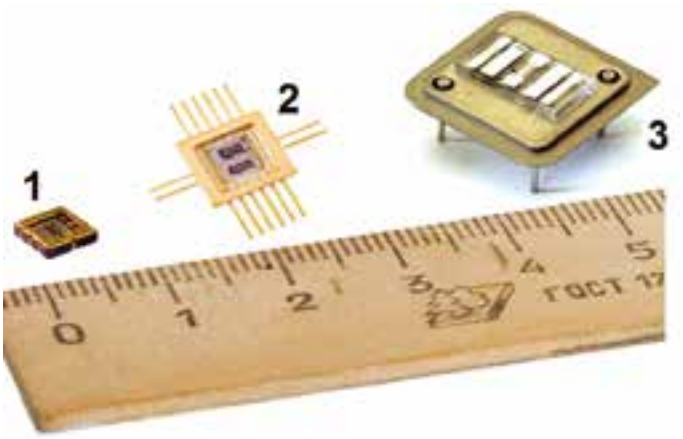

Рис. 3

Экспериментальные образцы импедансных среднеполосных фильтров с рабочими частотами более 1000 МГц были изготовлены на ниобате лития. На рис. 4 показано увеличенное изображение такого фильтра в безвыводном металлокерамическом корпусе, а на рис. 5 — его АЧХ. Следует отметить, что разработка и изготовление ПАВ-фильтров с рабочими частотами более 800—900 МГц накладывает физические и технологические ограничения, о которых будет сказано ниже.

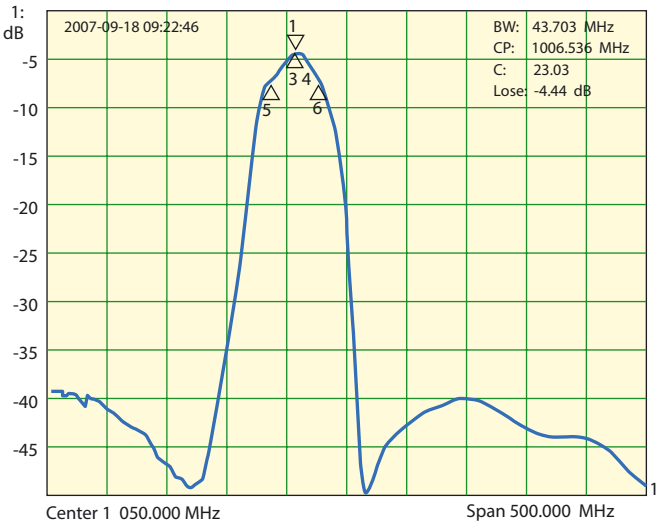

Рис. 5

Сверхузкополосные фильтры были разработаны на основе ПАВ-резонаторов с поперечными связями на пьезокварце [3]. Последнее обстоятельство очевидно, поскольку фильтр должен сохранять свои характеристики в широком диапазоне температур (110—130°). Для реализации заданных характеристик была решена задача выбора оптимального угла среза пьезокварца, на величину которого влияет не только температурный диапазон воздействий, но и рабочая частота.

Выбор оптимального угла среза позволил улучшить температурную стабильность фильтров в 3 раза и достичь уровня относительного температурного ухода частоты $\pm 5 \times 10^{-5}$ для фильтров с полосой пропускания 0,08—0,09%. Также разработан фильтр с улучшенной стабильностью частоты ($\pm 1 \times 10^{-5}$) при полосе пропускания около 0,04% [4]. На этот фильтр получен патент на изобретение [5]. Защищен патентом на изобретение и фильтр с повышенной до 0,15% полосой пропускания [6].

Сверхузкополосные фильтры могут быть реализованы в диапазоне рабочих частот 40—700 МГц с полосами пропускания от 0,02 до 0,15% при вносимых потерях 2,5—4,0 дБ и гарантированном затухании 75—85 дБ. Образцы таких фильтров на частоты 199,5 и 80,5 МГц представлены

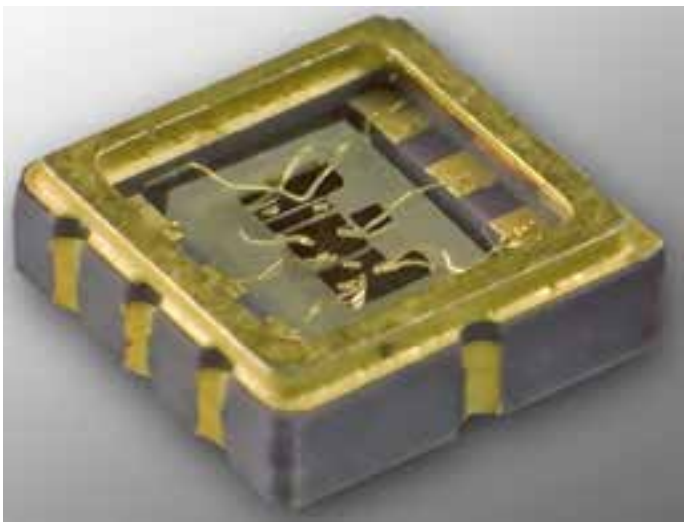

Рис. 4

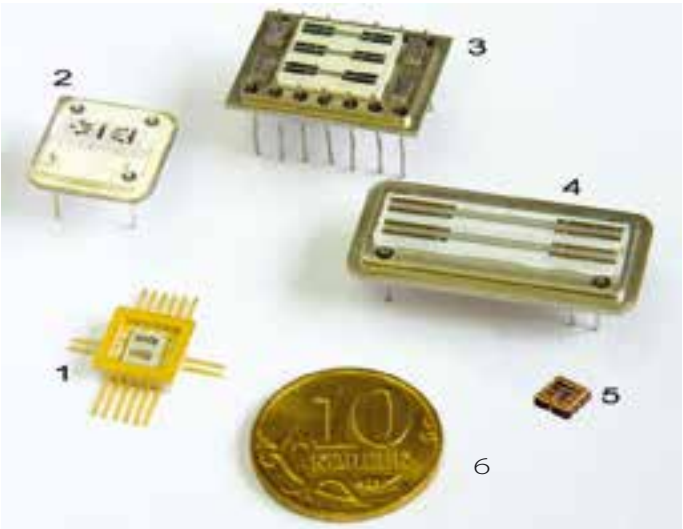

Рис.

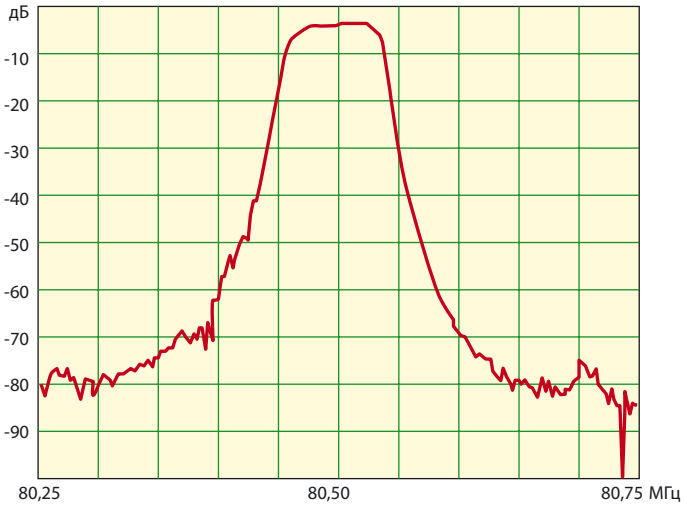

Рис. 7

на рис. 6 (образцы *3* и *4*, соответственно), а типичная АЧХ сверхузкополосного фильтра — на рис. 7.

Разработанные и выпускаемые ОАО «НПП «Полет» фильтры на ПАВ успешно применяются в приемопередающей аппаратуре радиостанций и комплексов связи летательных аппаратов, создаваемых также в ОАО «НПП «Полет». На рис. 6, кроме упомянутых выше сверхузкополосных фильтров (*3* и *4*), представлены: *1* — среднеполосный резонаторный на продольных модах на 276 МГц; *2* — узкополосный трансверсальный на 277,77 МГц; *5* — среднеполосный импедансный на 1005 МГц.

Проблемы развития, направления, пути решения. Одним из факторов, сдерживающих развитие технологии ПАВ, является отсутствие ряда отечественных пьезоматериалов. Если пьезокварц с заданным углом среза и качественными характеристиками выпускается предприятием ЗАО «Минерал», то танталат лития отечественными производителями не производится, а выпуск ниобата лития в настоящее время приостановлен. В сложившейся ситуации приходится использовать импортные материалы.

Дальнейшее развитие технологии изготовления фильтров на ПАВ связано с повышением их рабочих частот. Следует отметить, что применение оптической фотолитографии при создании акустоэлектронных устройств имеет физическое ограничение по рабочей частоте (около 1 ГГц), при которой длина световой волны становится соизмерима с минимальным размером элемента. При приближении к этим частотам, когда минимальные размеры элементов ПАВ-структуры становятся ≈1 мкм или менее, резко уменьшаются процент выхода годных и воспроизводимость характеристик фильтров.

Для повышения рабочих частот фильтров используются пьезоматериалы с повышенной по сравнению с пьезокварцем скоростью распространения акустической волны — танталат лития и ниобат лития. Именно на ниобате лития удалось изготовить фильтры с рабочими частотами более 1000 МГц. Однако указанные материалы могут обеспечить продвижение вверх по частоте не более чем на 30% и имеют гораздо худшие показатели по температурной стабильности частоты по сравнению с пьезокварцем. Поэтому представляют интерес акустические волны со скоростями около 10 км/с (в 3 раза выше, чем в кварце). Их применение позволит методами оптической литографии достичь рабочих частот 2,5—3,0 ГГц и более. Подобные устройства создаются на основе резонаторов на объемных акустических волнах, сформированных на многослойных пьезоэлектрических пленках толщиной от микрона и менее. Для изготовления таких пьезоэлектрических структур необходимо дорогостоящее оборудование, специальные методы контроля и технологии. Одним из путей решения этой задачи является привлечение других организаций к работам по кооперации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Багдасарян А. С**. Устройства на поверхностных акустических волнах. Состояние и перспективы развития.— 2009. _ genmeetingsdocs_2009_Ph&A_Baghdasaryan_A.S.
2. **Гуляев Ю. В., Медведь А. В., Ванг Фонг Х.** Физические принципы работы устройств на поверхностных акустических волнах для систем связи и обработки информации // Радиотехника.— 2002.— № 1.— С. 90—107.
3. **Белоусов В. А., Гапшин В. К., Яковлев Ф. Ф**. Сверхузкополосные высокостабильные фильтры на поверхностных акустических волнах с малыми вносимыми потерями для радиосвязной аппаратуры / XI Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 12—14 апреля 2005 г.— Т. 1.— С. 281.
4. **Яковлев Ф. Ф., Белоусов В. А., Гапшин В. К**. Сверхузкополосный фильтр на ПАВ с малыми вносимыми потерями и улучшенной температурной стабильностью / XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 13—15 апреля 2010 г.— Т. 1.— С. 441.
5. **Яковлев Ф. Ф., Белоусов В. А., Гапшин В. К**. Способ повышения температурной стабильности частоты узкополосного фильтра на ПАВ и узкополосный фильтр на ПАВ с повышенной температурной стабильностью частоты / Патент на изобретение № 2479118. Заявка № 2012107580, приоритет изобретения 28.02.2012. Зарегистрировано 10.04.2013.
6. **Яковлев Ф. Ф., Гапшин В. К., Кудряшов С. А**. Фильтр на поверхностных акустических волнах / Патент на изобретение № 2348101. Заявка № 2007120893, приоритет изобретения 04.06.2007. Зарегистрировано 27.02.2009.

Получено10.06.14