

ТЕХНИКА ПАВ: БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

А.С. Багдасарян ^{1,2,4}, Ю.В. Гуляев.¹, С.А. Доберштейн ³, Т.В. Синицына ⁴

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² ФГУП НИИР, Москва

³ АО «ОНИИП», Омск

⁴ ООО «БУТИС», Москва

IV Международная научно-техническая конференция

«Радиотехника, электроника и связь»

15-16 ноября 2017г., Россия, Омск

Введение

В настоящее время техника поверхностных акустических волн (ПАВ) - одна из самых инновационных технологий в мире, а устройства на ПАВ являются ключевыми элементами современных систем телекоммуникаций и навигации, систем распознавания и идентификации, систем измерения и контроля состояния окружающей среды и объектов. На основе мировых тенденций можно выделить следующие ближайшие перспективы развития техники ПАВ:

- повышение рабочих частот,
- снижение вносимых потерь,
- уменьшение размеров,
- улучшение температурной стабильности,
- увеличение входной мощности проходящего сигнала,
- создание интеллектуальных устройств на ПАВ с новыми возможностями.

Повышение рабочих частот

Ведущие мировые производители техники ПАВ в настоящее время выпускают ПАВ-устройства в диапазоне частот 30-2800 МГц. Рабочая частота f_0 любого ПАВ-устройства определяется по формуле $f_0=V/p$, где V – скорость ПАВ, p – период электродов встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Повышение рабочих частот устройств на ПАВ связано с решением простой на первый взгляд задачи: использовать пьезоматериалы с высокой скоростью ПАВ V или уменьшать период электродов p ВШП.

Первый вариант требует уникальные материалы с большой V или использование определенных типов акустических волн с большой V в стандартных пьезоматериалах.

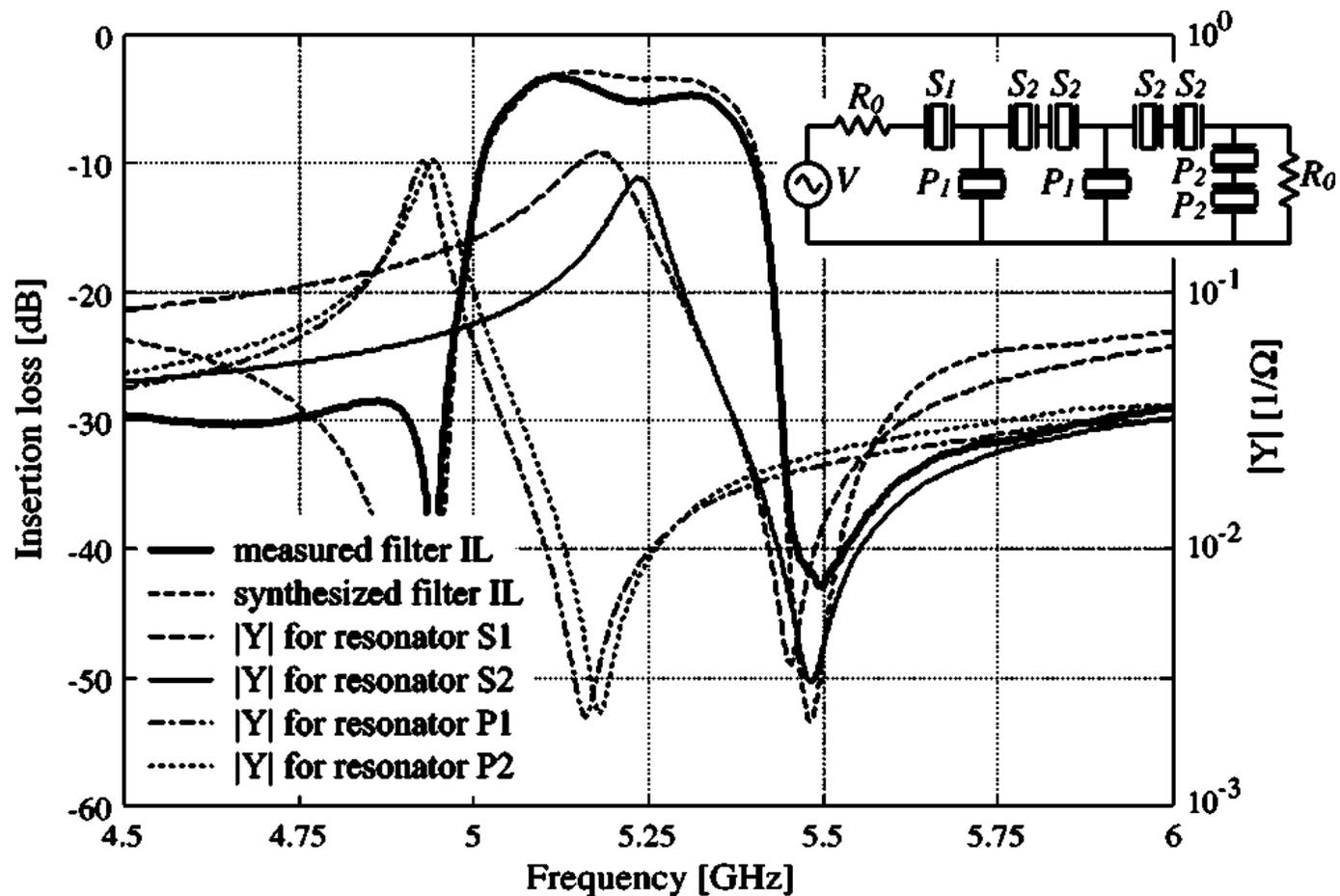
Во втором случае можно использовать стандартные пьезоматериалы LiNbO_3 , LiTaO_3 , но электроннолучевую литографию, позволяющую получить электроды с очень малым периодом до 100 нм

Продольные вытекающие ПАВ с высокой скоростью на LiNbO_3

АЧХ фильтра на ПАВ на 5 ГГц с вносимыми потерями 3 дБ

LiNbO_3 $V=6100$ м/с – высокая скорость
 $p=1,2$ мкм – обычный период электродов

Fundamental mode 5 GHz surface-acoustic-wave filters using optical lithography / T. Makkonen [et al.] // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83(17). P. 3596–3598.



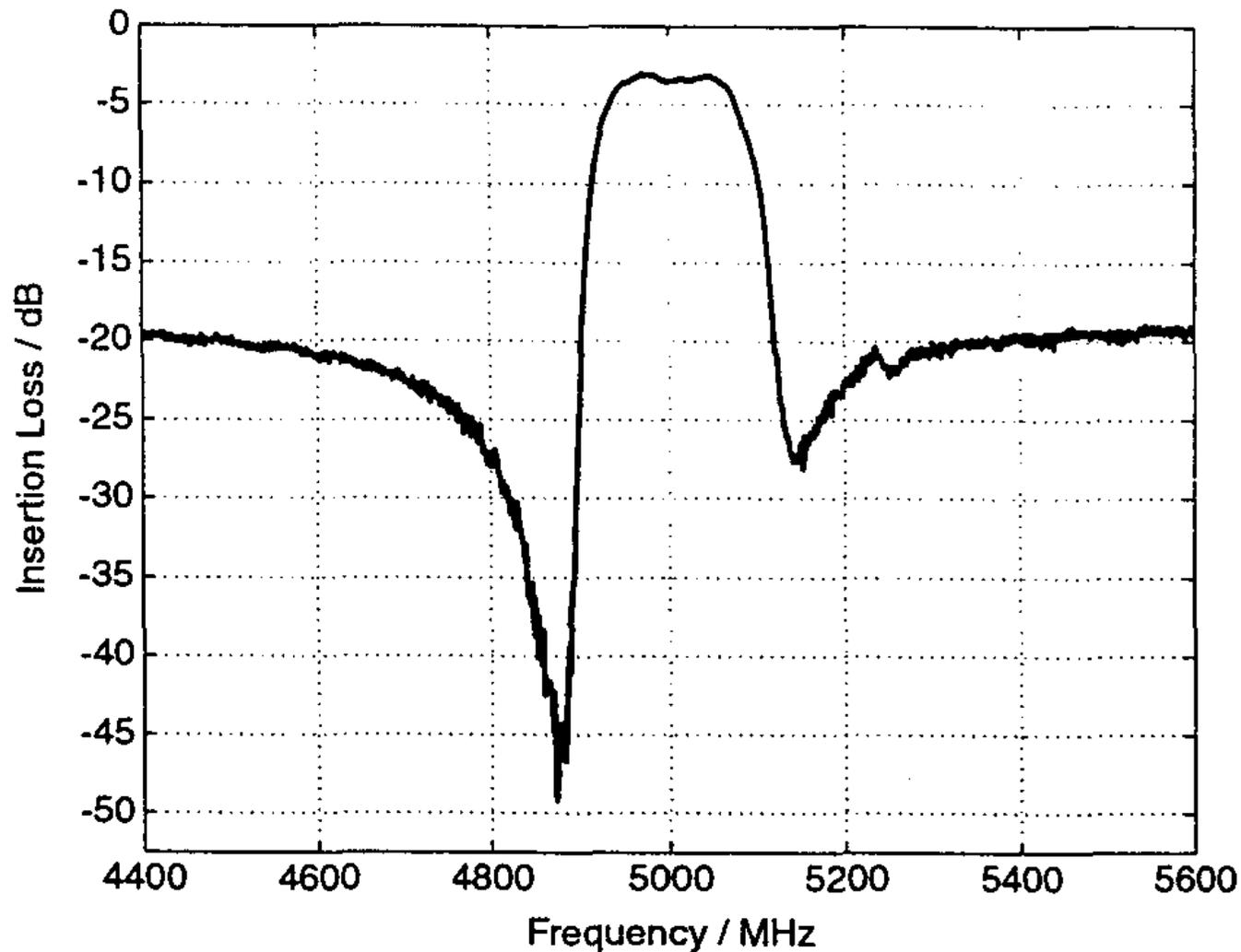
Стандартный материал LiTaO_3 + электроннолучевая фотолитография

LiTaO_3 $V=4200$ м/с – низкая скорость
 $p=840$ нм – малый период электродов

SAW Impedance Element Filters for 5 GHz and beyond / S. Lehtonen [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. P. 395–399.

Диапазон частот ПАВ-устройств в ближайшее время может быть расширен до 3-10 ГГц за счет использования пьезоматериалов с высокой скоростью ПАВ или электронно-лучевой фотолитографии для формирования топологий.

АЧХ фильтра на ПАВ на 5 ГГц с вносимыми потерями 3 дБ



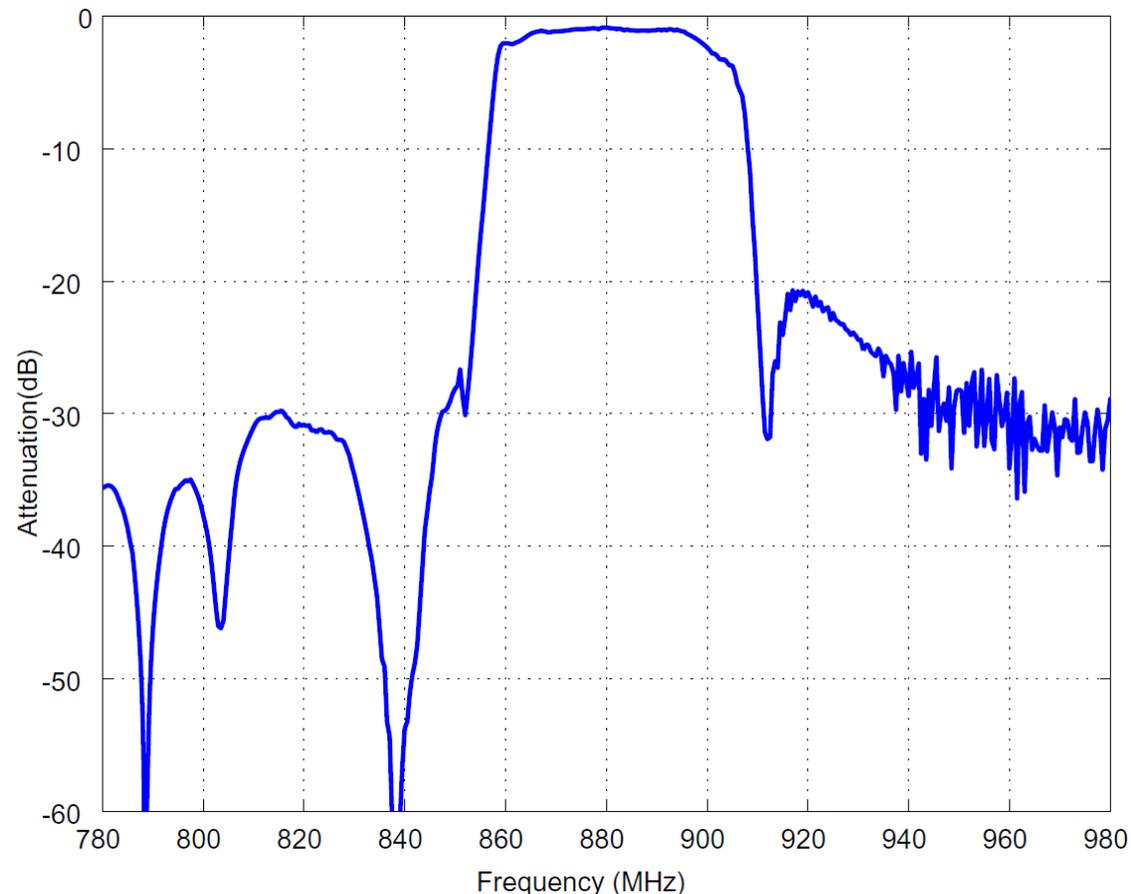
Снижение вносимых потерь

В гигагерцовом диапазоне вносимые потери 1 дБ достигаются на резонаторных двухмодовых структурах (DMS-фильтры) и резонаторных лестничных структурах (импедансные фильтры)

0806 SAW Filters using Wafer Level Packaging Technology / T. Fucano [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 68–71.

В будущем получение вносимых потерь в фильтрах на ПАВ менее 1 дБ возможно в устройствах с локализацией акустической энергии и с самосогласованием за счет минимизации потерь на распространение, потерь в металле электродов преобразователей, потерь вытекающих волн, пространственных потерь на излучение акустических волн.

АЧХ фильтра на ПАВ на 880 МГц с вносимыми потерями 1 дБ



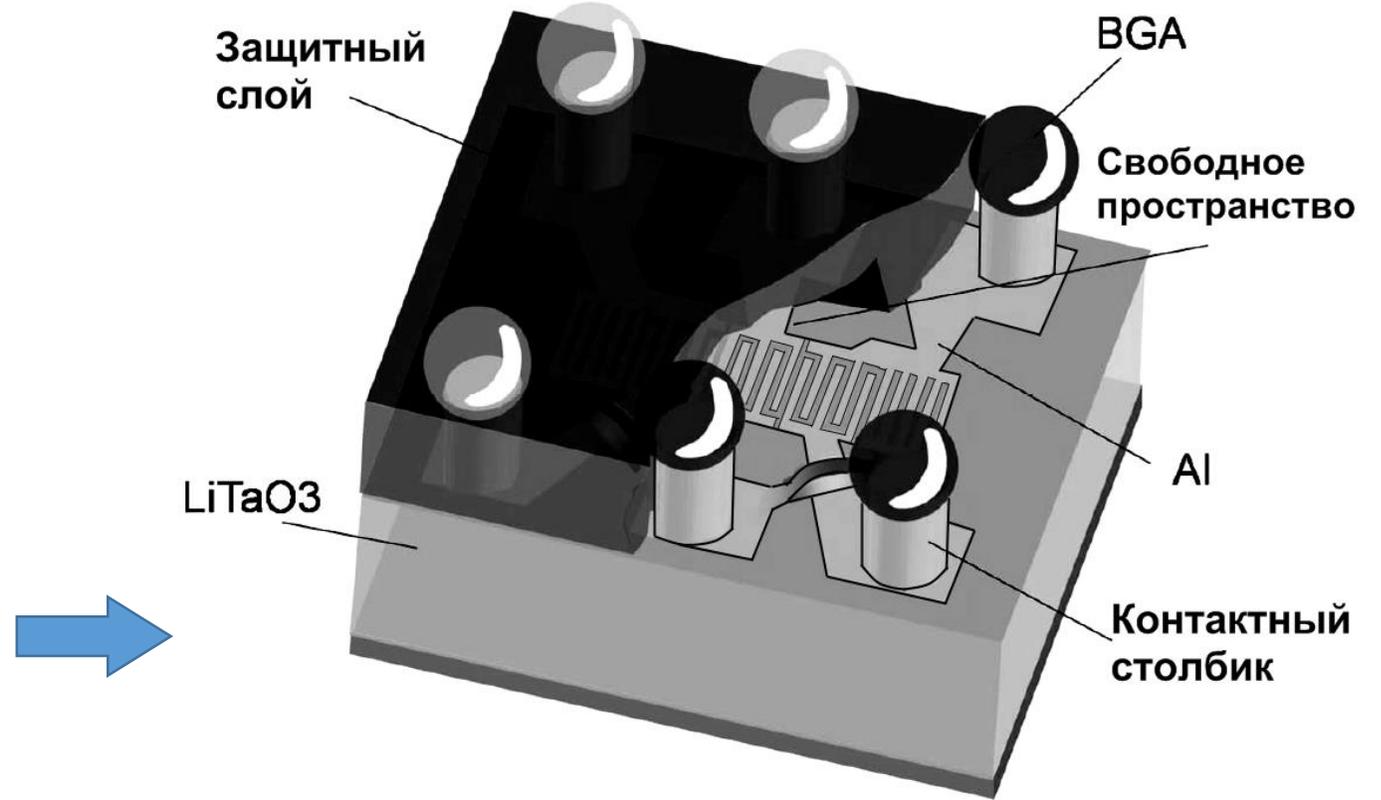
Уменьшение размеров

Корпусирование в SMD-корпуса
(Surface Mounted Device),
минимальные размеры 2,0x2,0 мм

Корпусирование по размеру кристалла -
технология CSSP
(Chip Sized SAW Package),
минимальные размеры 1,4x1,1 мм.

Корпусирование на уровне подложки
по технология WLP
(Wafer Level Package),
минимальные размеры 0,8x0,6 мм

В ближайшее время гигагерцовые фильтры
на ПАВ будут корпусироваться по
технологии WLP подобно обычным SMD-
компонентам типоразмера 0201.



0806 SAW Filters using Wafer Level Packaging
Technology / T. Fucano [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics
Symposium. 2007. P. 68–71.

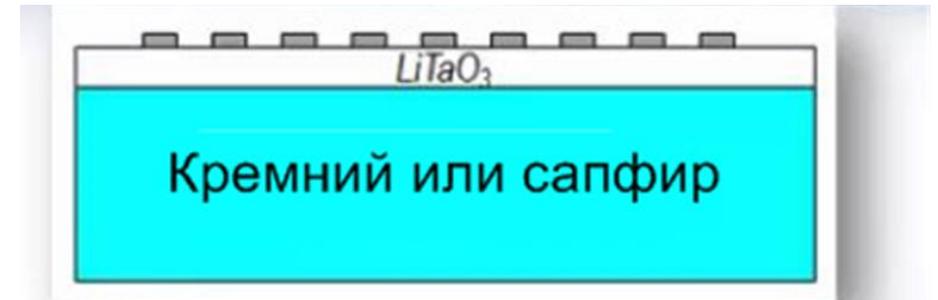
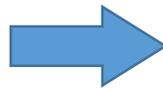
Улучшение температурной стабильности

Лучшие пьезоматериалы для ПАВ-устройств с высокой термостабильностью срезы кварца ST-X, ST-Z и лангасита, у которых $TKЧ \approx 0$.

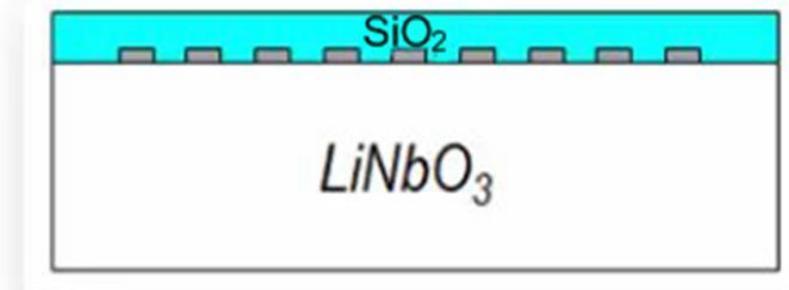
Первый метод термокомпенсации – использование в качестве несущей подложки материала с низким коэффициентом теплового расширения.

Второй метод – использование материалов с различными по знаку ТКЧ.

Улучшение температурной стабильности техники ПАВ в будущем за многослойными ТК структурами, поскольку именно они обеспечивают параметры, не встречающиеся в известных пьезоматериалах.



TKЧ уменьшен с $45 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ до $15-25 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$



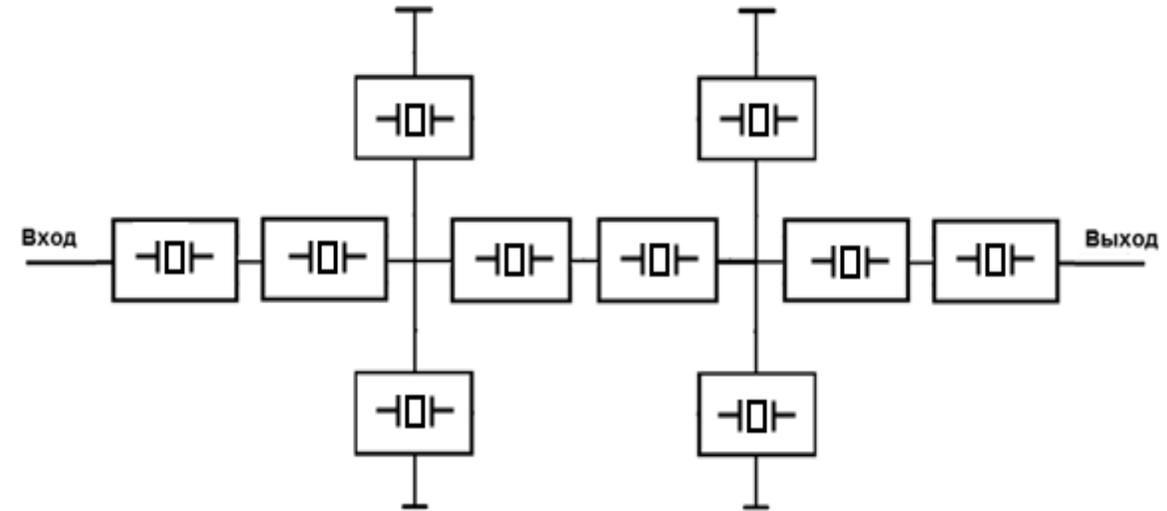
TKЧ уменьшен с $75 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ до $0-20 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$

Lam C. S. A Review of the Timing and Filtering Technologies in Smartphones // Proc. IEEE Frequency Control Symposium. 2016. P. 48–53.

Увеличение входной мощности проходящего сигнала

На сегодняшний день известны лестничные фильтры на ПАВ на LiTaO_3 и LiNbO_3 в диапазоне частот 200-2170 МГц, выдерживающие входную мощность сигнала до 2,3 Вт. Структурная схема фильтра на 2170 МГц – это последовательное и параллельное соединение множества ПАВ-резонаторов в виде ВШП с большим числом электродов и малым числом электродов в отражателях. В топологии фильтра использовалось многослойное напыление $\text{Ti}+\text{Al}+\text{Ti}+\text{Al}$. Фильтр имеет вносимые потери 1,8 дБ, полосу пропускания 82 МГц, коэффициент прямоугольности 1,9.

Увеличение входной мощности устройств на ПАВ до единиц ватт в гигагерцовом диапазоне будет достигаться за счет распределенных топологий и специальных многослойных структур электродов преобразователей.



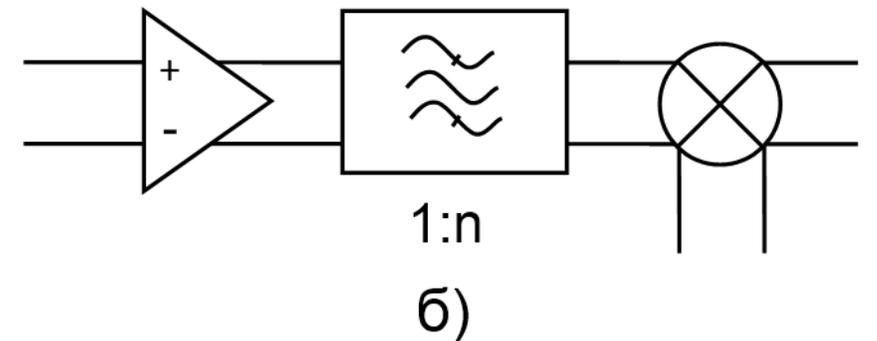
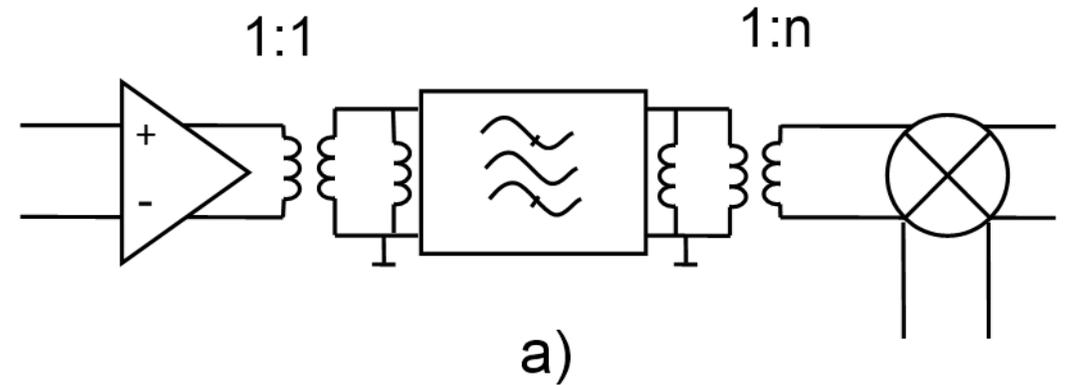
Багдасарян А. С., Сеницына Т. В. Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1–2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 3 (30). С. 80–89.

Создание интеллектуальных устройств на ПАВ с новыми возможностями

По-прежнему полосовые фильтры на ПАВ будут составлять основу техники ПАВ. Однако это будут более интеллектуальные фильтры с такими дополнительными возможностями, как преобразование импедансов, переход от небалансного включения к балансному или полное балансное включение и самосогласование для совмещения с современными микросхемами балансных усилителей и смесителей.

Meier H., Baier T., Riha G. Miniaturization and advanced functionalities of SAW devices // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. P. 395–401.

Доберштейн С. А. Балансные ПАВ-фильтры с малыми потерями и преобразованием импедансов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 12. С. 18–28.

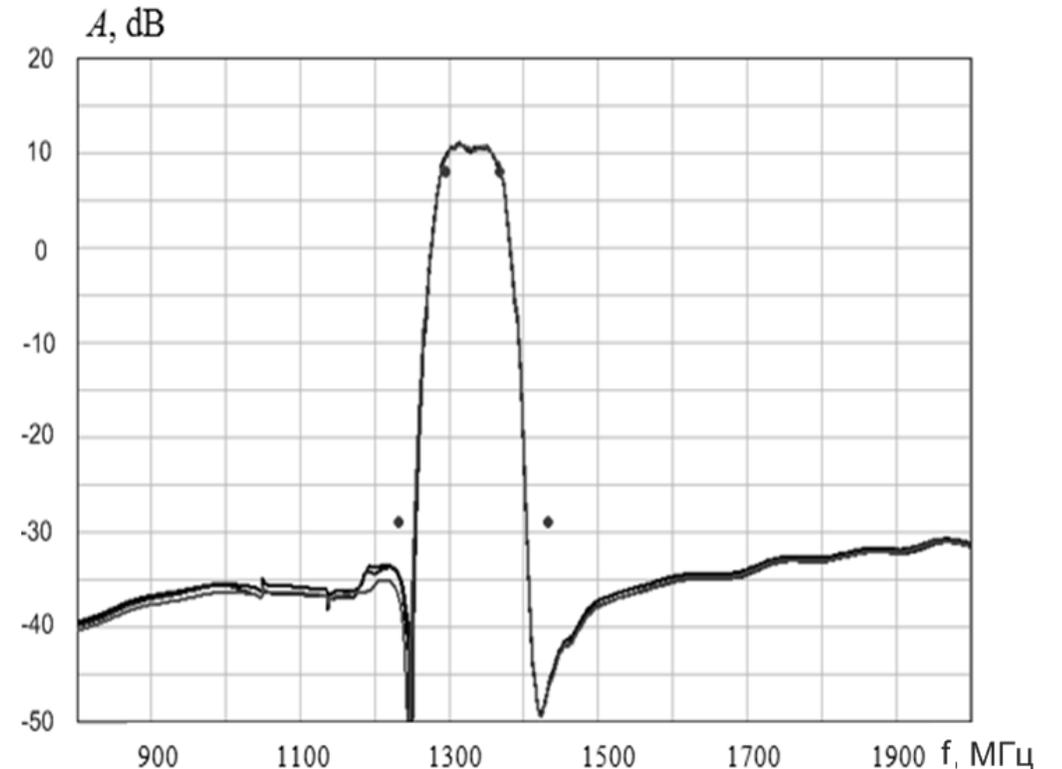
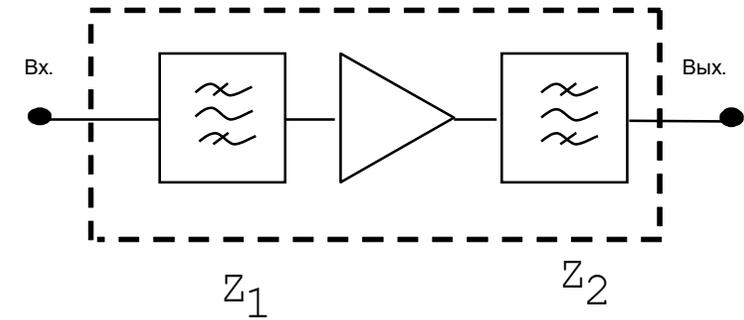


Сравнение обычного ПАВ-фильтра (а) и балансного самосогласованного ПАВ-фильтра с преобразованием импедансов (б)

ПАВ-микросборки, комбинирующие фильтры и усилитель

Одна из самых распространенных схем ПАВ-микросборок – это система фильтр на ПАВ (Z_1)-усилитель-фильтр на ПАВ (Z_2). Таким образом создан «ПАВ-фильтр без потерь». Коэффициент шума $K_{ш}$ такого модуля меньше, чем $K_{ш}$ каскадного соединения нескольких ПАВ-фильтров и усилителя, включенного после фильтров. Известны подобные ПАВ-микросборки на диапазон частот 600-1330 МГц с относительной полосой пропускания $\Delta f/f_0=1-8\%$ в SMD-корпусах, обеспечивающие избирательность 45-50 дБ, усиление 10 – 15 дБ и $K_{ш}=7$ дБ.

Частотно-избирательные микроблоки на основе фильтров на поверхностных акустических волнах / Т. В. Синицына [и др.] // Радиотехника. 2016. № 5. С. 105–111.

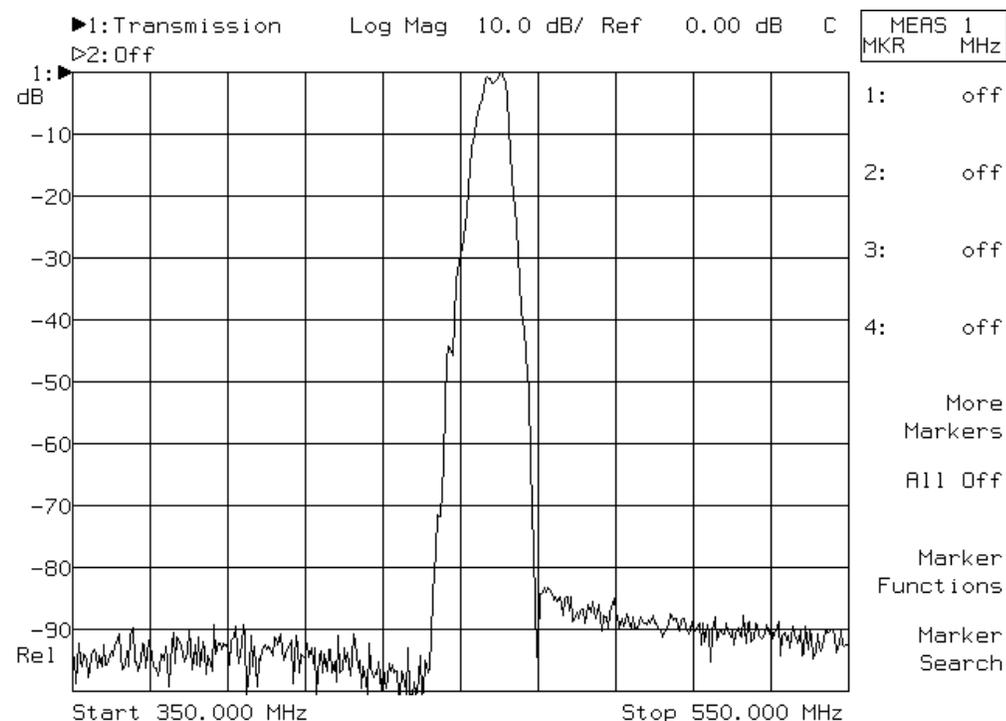
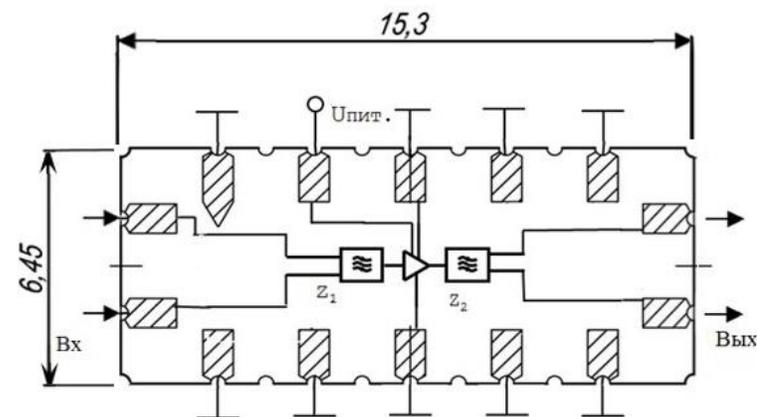


Балансные ПАВ-микросборки, комбинирующие фильтры и усилитель

При использовании балансных ПАВ-фильтров в схеме можно значительно улучшить избирательность ПАВ-микросборок. Избирательность таких микросборок будет всегда больше, чем избирательность двух каскадных ПАВ-фильтров в одном корпусе или в двух отдельных корпусах, расположенных на печатной плате. Известны ПАВ-микросборки на диапазон частот 150-500 МГц при $\Delta f/f_0=1,5-6\%$ с балансными ПАВ-фильтрами с усилением 10-16 дБ и предельной избирательностью 80-90 дБ.

Доберштейн С. А. Разработка низкочастотных ПАВ-фильтров и высокочастотных ПАВ-микросборок в отечественных корпусах под поверхностный монтаж // Техника радиосвязи. 2015. Вып. 1 (24). С. 92–103.

На основе ПАВ-микросборок могут быть созданы высокоизбирательные переключаемые ПАВ-преселекторы с внешней электронной коммутацией с любой перестройкой по частоте до 100% для входных каскадов УКВ-аппаратуры связи.



Радиометки и датчики на ПАВ

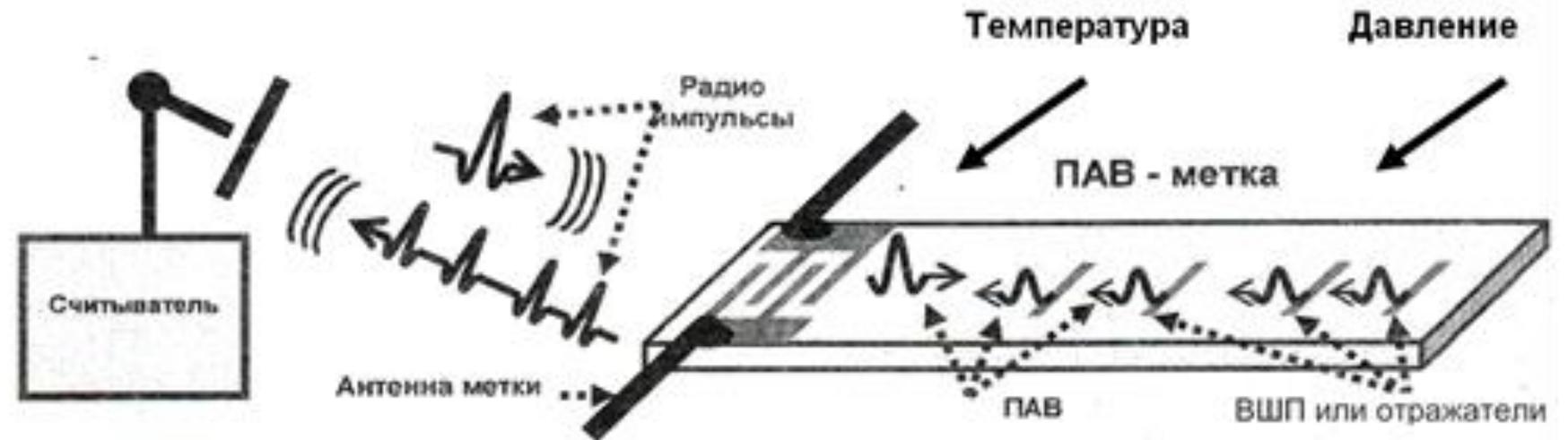
Потенциально объем выпуска радиометок на ПАВ значительно превысит объем выпуска фильтров на ПАВ.

Объединение радиометок с различными датчиками приведёт к созданию интеллектуальных устройств на ПАВ с возможностью измерения, например, давления, и радиопередачи сигнала с радиометки, содержащего информацию о коде метки и давлении.

Радиометка сама по себе может также быть датчиком температуры, поскольку задержка импульсов радиометки зависит от температуры. В этой связи, наилучшим решением задачи построения беспроводных высокотемпературных датчиков является использование радиометок на ПАВ.

Гуляев Ю. В., Багдасарян С. А. Радиочастотная идентификация с использованием технологии ПАВ // Наука и технологии в промышленности. 2005. № 1. С. 54.

Wireless Harsh Environment SAW Array System for Power Plant Application / M. Pereira da Cunha [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2014. P. 381–384.



Исследования, необходимые для успешного развития техники ПАВ

Для прогресса техники ПАВ по представленным перспективным направлениям развития необходимо проводить исследования, направленные на повышение технологического уровня устройств на ПАВ по следующим аспектам:

- поиск и синтез монокристаллов новых пьезоматериалов;
- формообразование пластин и кристаллических элементов;
- прецизионное напыление металлических пленок с точностью до нескольких атомарных слоёв;
- прецизионная фотолитография для формирования элементов топологий с точностью до нескольких нм и с минимальным размером менее 100 нм;
- интеграция ПАВ-, WLP- и LTCC-технологий для корпусирования.

Перечисленные исследования подготовят базу для создания новых теорий и физических моделей, а также для разработки новых классов и поколений устройств с уникальными характеристиками, определяющими мировой уровень развития техники ПАВ.