

# ТЕХНИКА ПАВ: БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

А.С. Багдасарян <sup>1,2,4</sup>, Ю.В. Гуляев.<sup>1</sup>, С.А. Доберштейн <sup>3</sup>, Т.В. Синицына <sup>4</sup>

<sup>1</sup> ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup> ФГУП НИИР, Москва

<sup>3</sup> АО «ОНИИП», Омск

<sup>4</sup> 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.

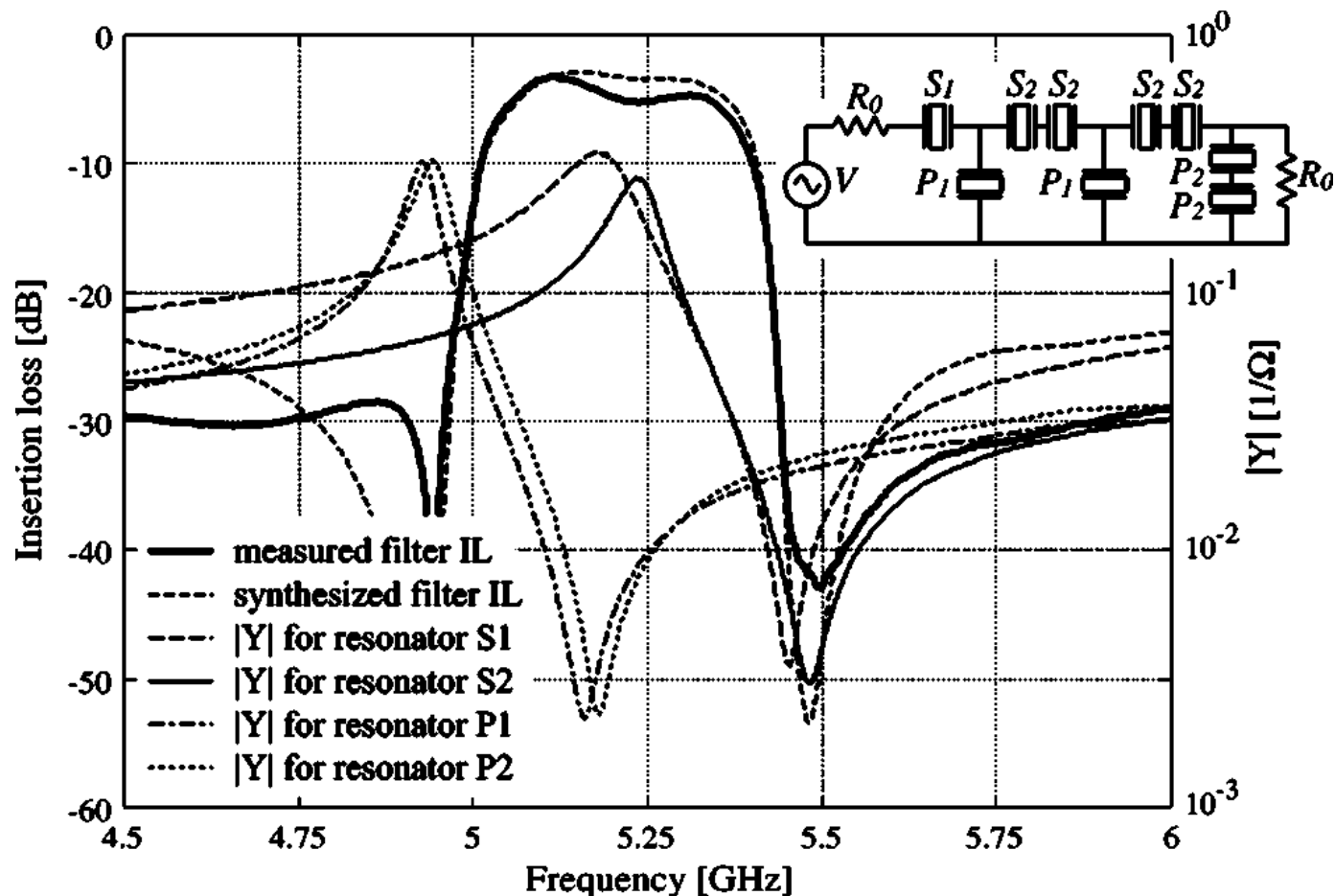
Во втором случае можно использовать стандартные пьезоматериалы  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ , но электроннолучевую литографию, позволяющую получить электроды с очень малым периодом до 100 нм

# Продольные вытекающие ПАВ с высокой скоростью на $\text{LiNbO}_3$

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

$\text{LiNbO}_3$   $V=6100$  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.



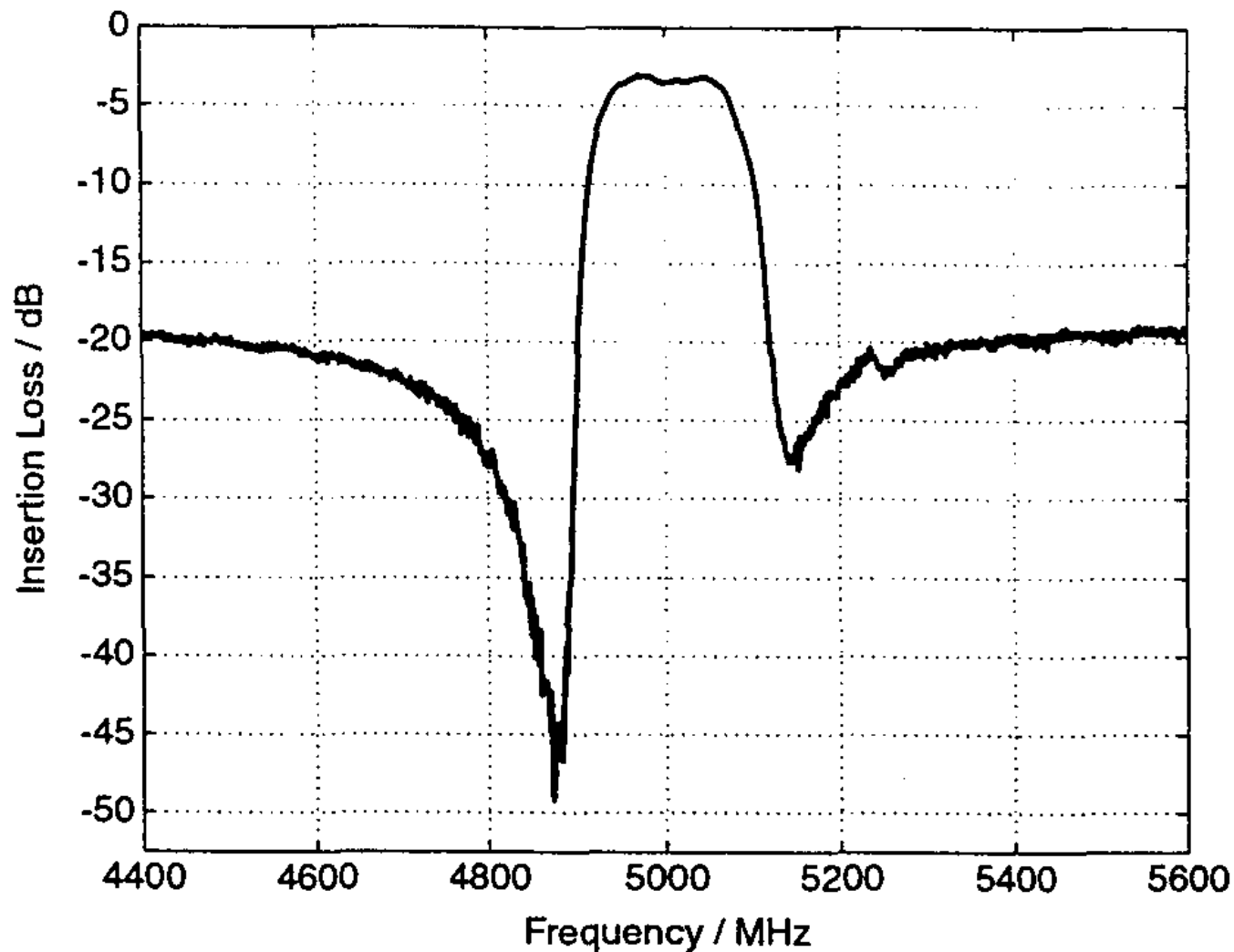
# Стандартный материал $\text{LiTaO}_3$ + электроннолучевая фотолитография

$\text{LiTaO}_3$   $V=4200$  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



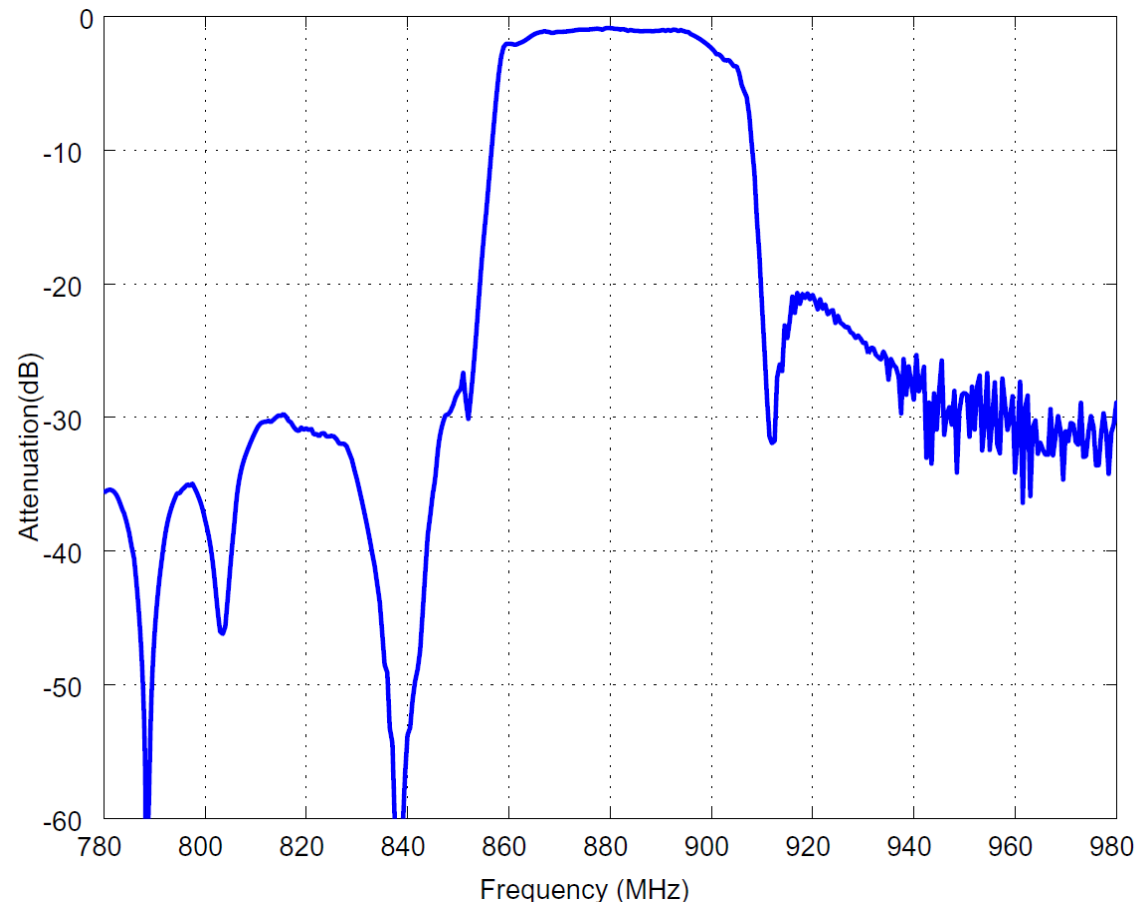
# Снижение вносимых потерь

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



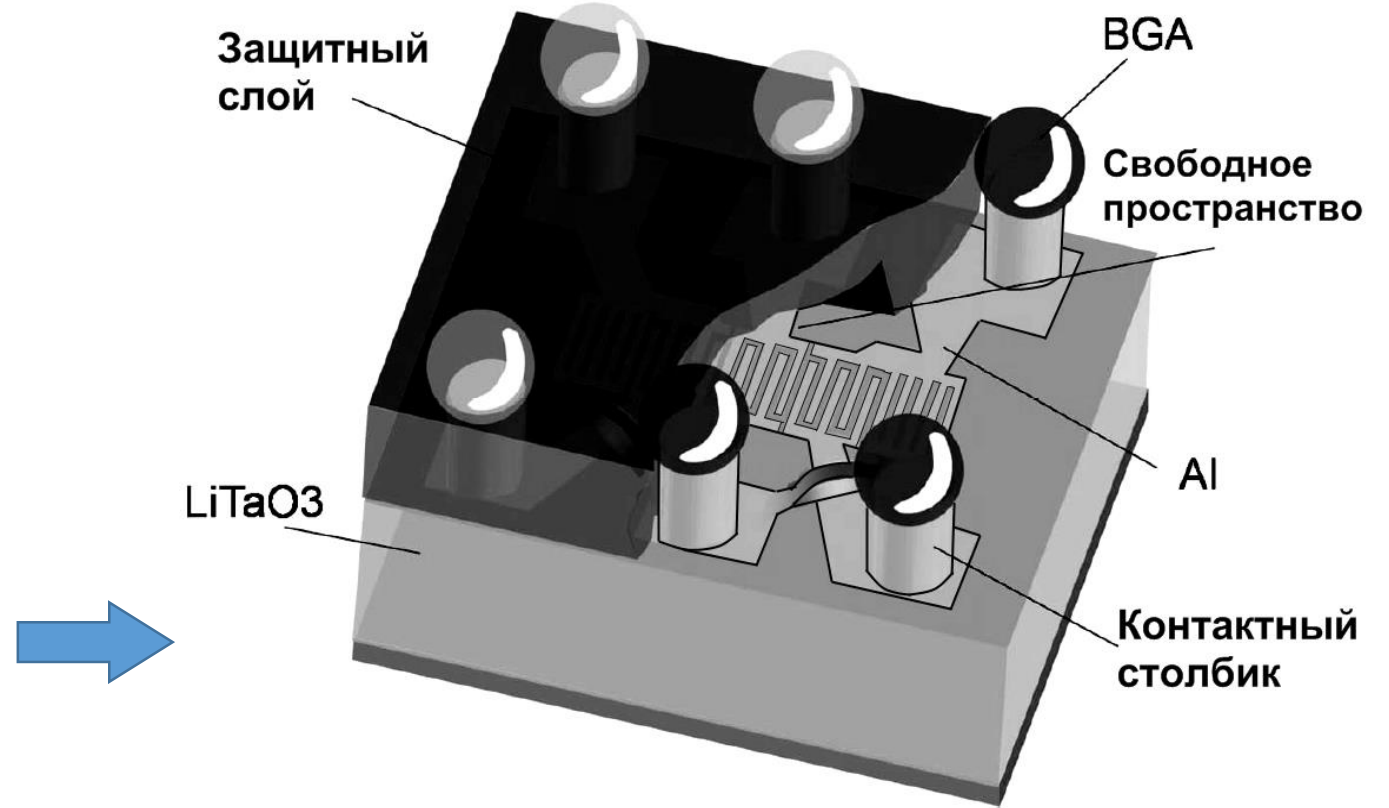
# Уменьшение размеров

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.

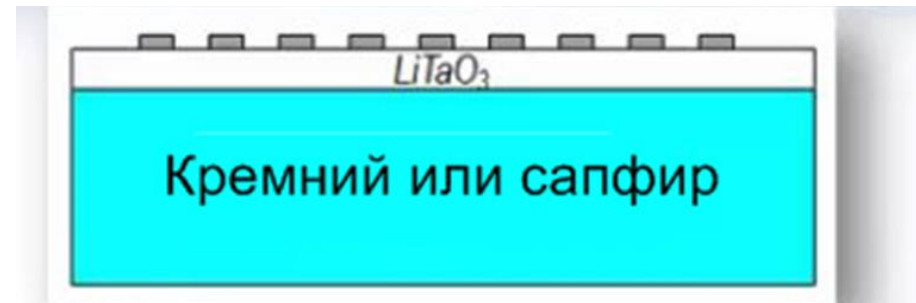
# Улучшение температурной стабильности

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

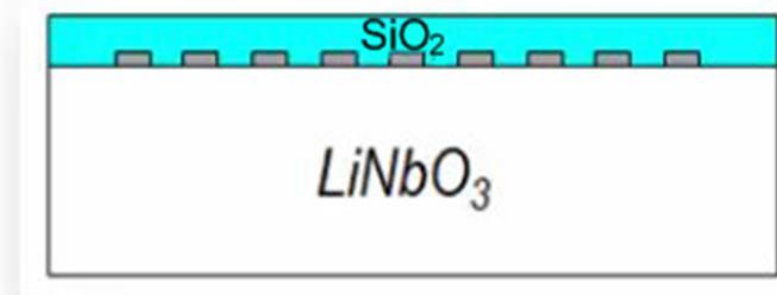
Первый метод термокомпенсации – использование в качестве несущей подложки материала с низким коэффициентом теплового расширения.

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  $0-20 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$

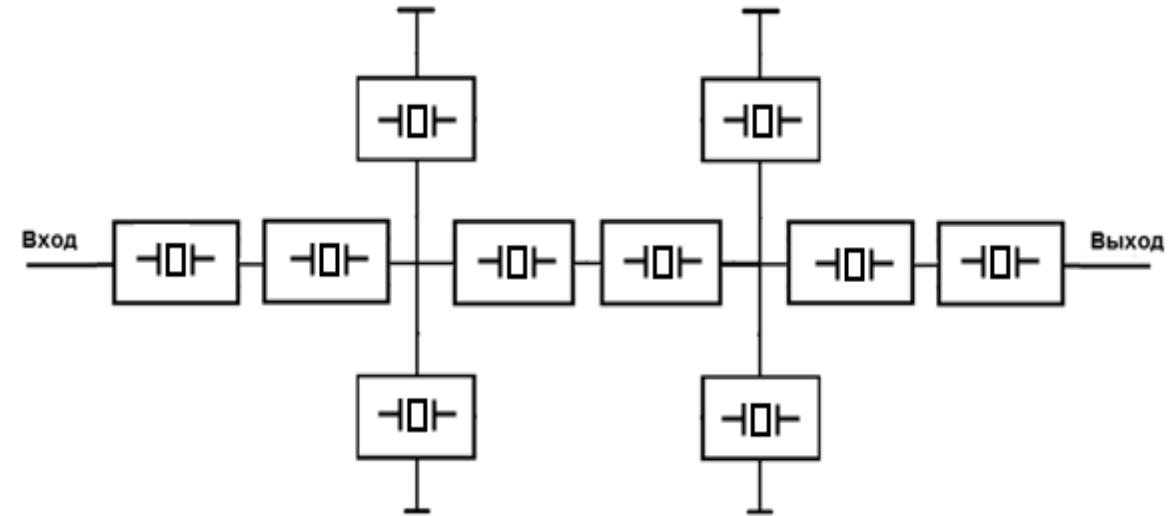
*Lam C. S. A Review of the Timing and Filtering Technologies in Smartphones // Proc. IEEE Frequency Control Symposium. 2016. P. 48–53.*



# Увеличение входной мощности проходящего сигнала

На сегодняшний день известны лестничные фильтры на ПАВ на  $\text{LiTaO}_3$  и  $\text{LiNbO}_3$  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.



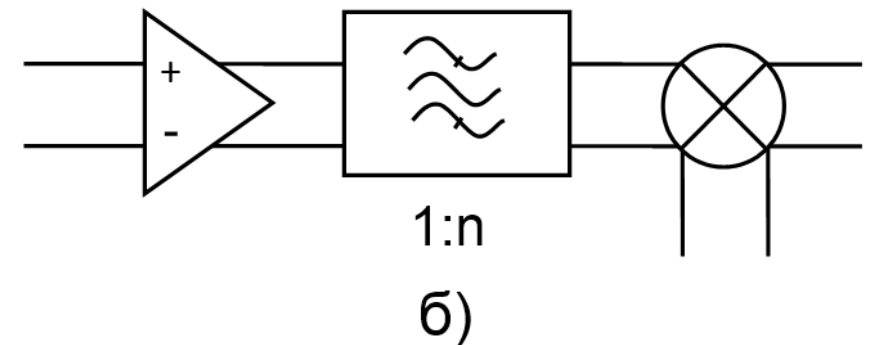
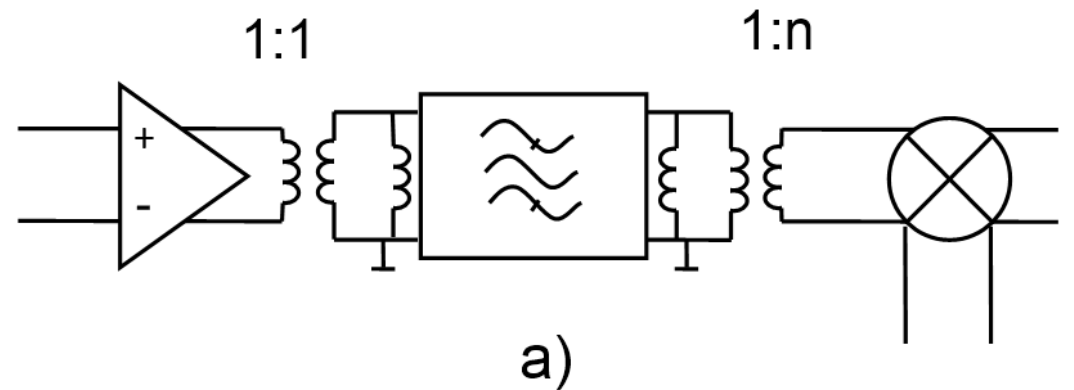
*Багдасарян А. С., Сеницына Т. В.* Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1–2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 3 (30). С. 80–89.

# 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.

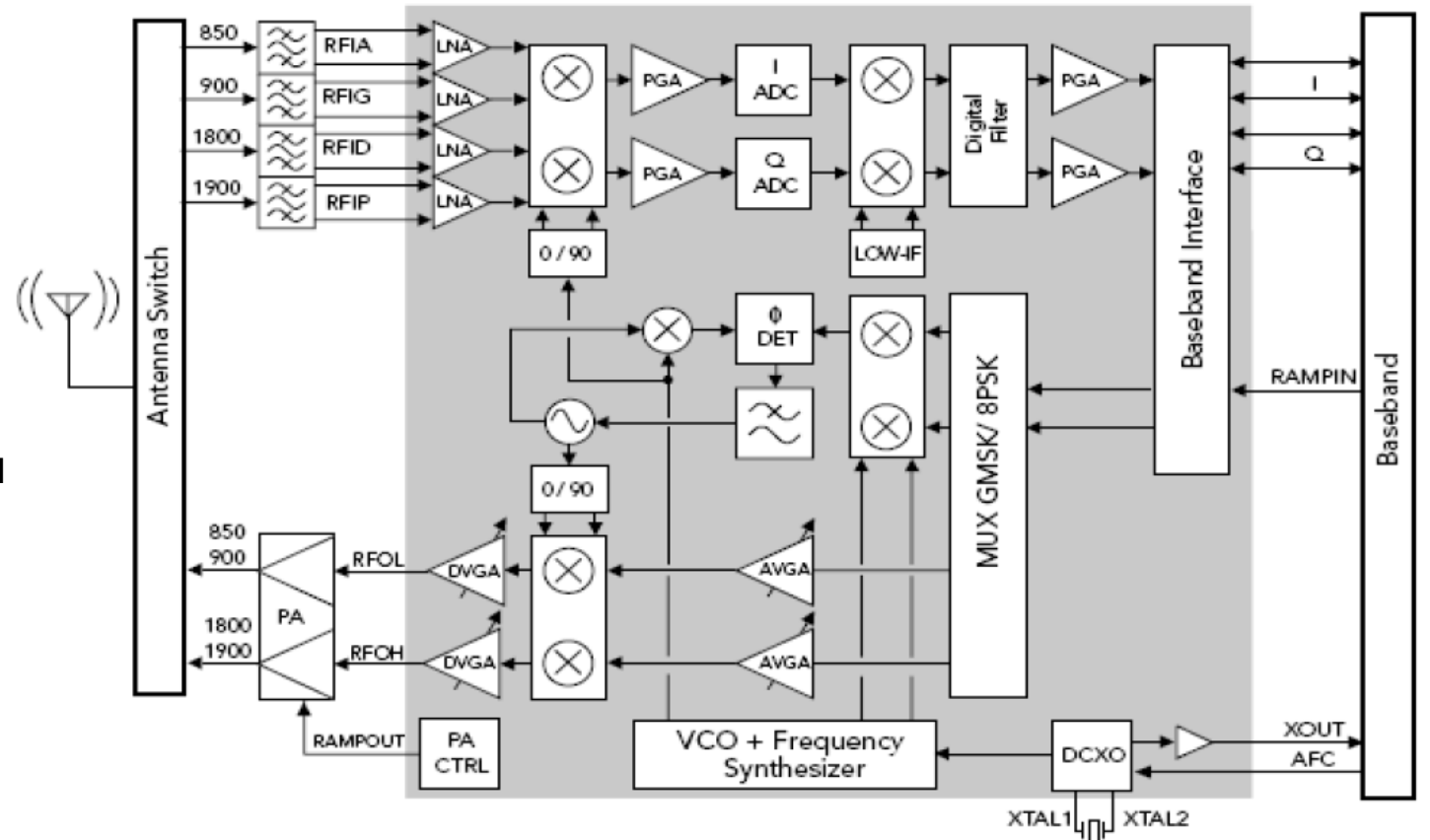
*Доберштейн С. А.* Балансные ПАВ-фильтры с малыми потерями и преобразованием импедансов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 12. С. 18–28.



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

# Полосовые фильтры на ПАВ – компоненты дуплексоров и мультиплексоров.

В чипсете сотового приемопередатчика для поддержки стандартов GSM-850, EGSM-900, DCS-1800 и PCS-1900 фильтрация осуществляется ПАВ-фильтрами на частоты 850, 900, 1800, 1900 МГц соответственно. ПАВ-фильтры, корпусированные по технологии CSSP или WLP, входят в состав такого модуля, изготовленного по технологии LTCC (низкотемпературная керамика). Вообще интеграция ПАВ-, WLP- и LTCC-технологий станет платформой для дуплексоров, мультиплексоров и входных модулей смартфонов ближайших поколений

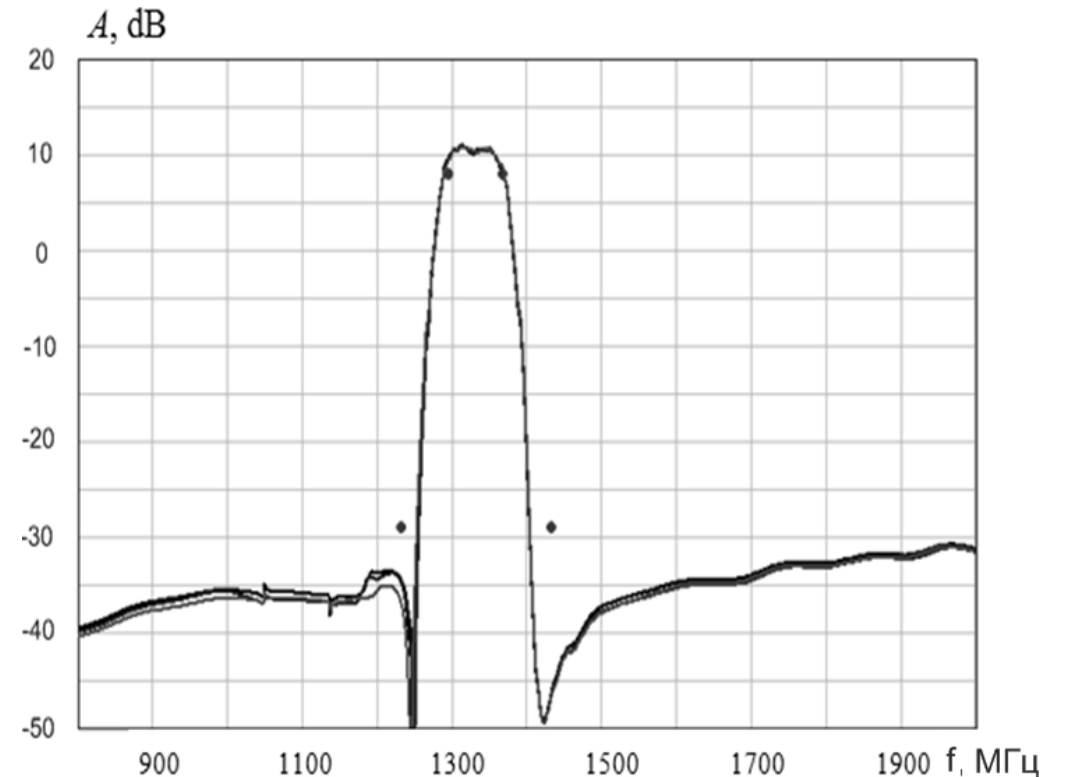
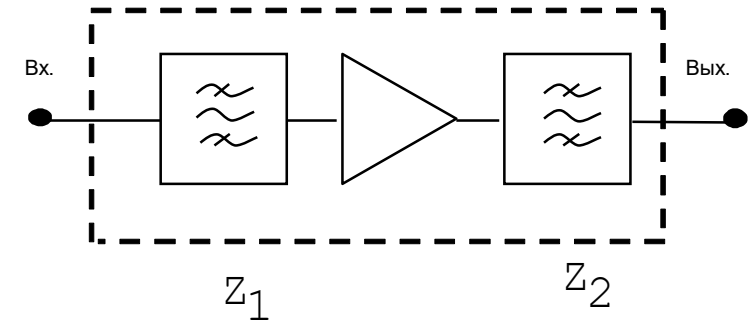


*Lam C. S. A Review of the Timing and Filtering Technologies in Smartphones // Proc. IEEE Frequency Control Symposium. 2016. P. 48–53.*

# 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.

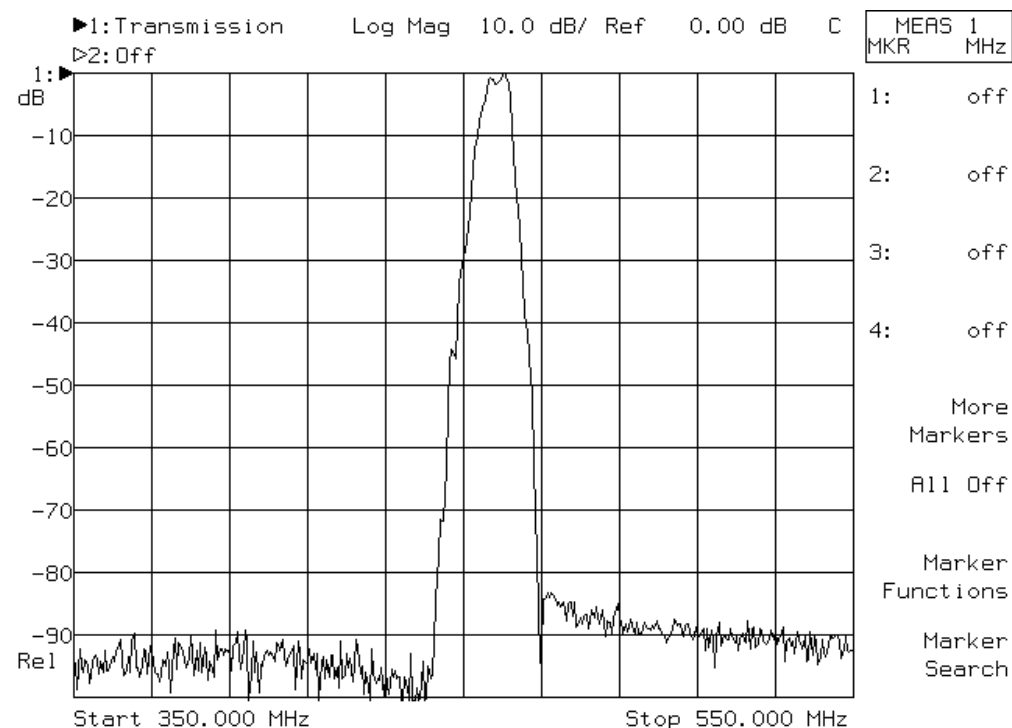
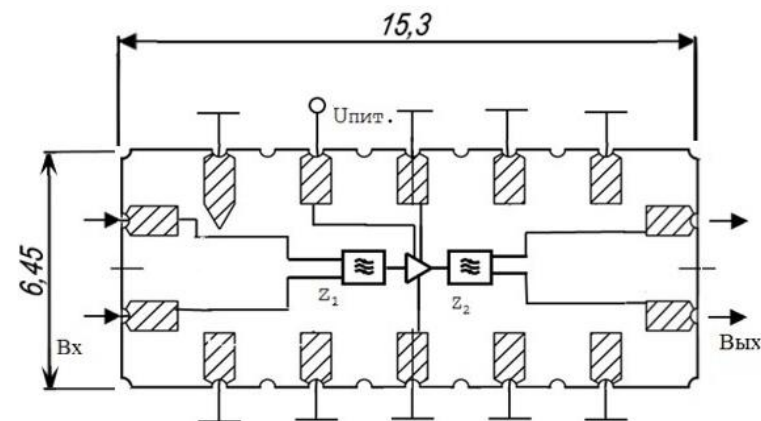


# Балансные ПАВ-микросборки, комбинирующие фильтры и усилитель

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

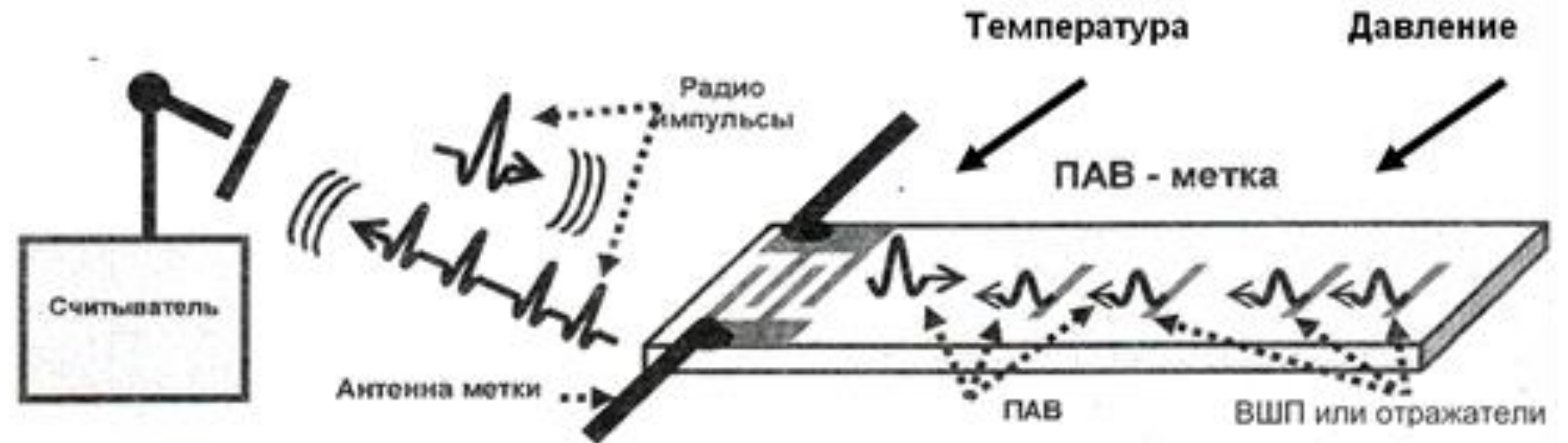
Потенциально объем выпуска радиометок на ПАВ значительно превысит объем выпуска фильтров на ПАВ.

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.