

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЛАНГАСИТА

**Работы, связанные с использованием лангасита (лантангаллиевого силиката, ЛГС) в изделиях селекции и стабилизации частоты и в различных типах датчиков, велись с середины 1980-х годов в НИИ "Фонон", а затем и на предприятиях группы "Пьезо". Уникальное сочетание ряда физических свойств этого монокристалла позволило создать изделия пьезотехники, которые не имеют мировых аналогов. Особенно эффективным оказалось применение лангасита в монокристаллических фильтрах.**

Фильтры, применяемые в современной радиоэлектронной аппаратуре, должны отвечать ряду требований по величине полосы пропускания и крутизне частотной характеристики затухания (ЧХЗ), а также минимальному искажению группового времени задержки (ГВЗ), миниатюрности и надежности.

Традиционный материал для фильтров – монокристаллы кварца – не позволяет реализовать ряд фильтров на объемных акустических волнах (ОАВ). Например, нельзя создать фильтры с относительной шириной полосы пропускания более 0,4% в монокристаллическом исполнении [1], так как у термостабильного АТ-среза кварца невысокие значения коэффициента электромеханической связи (7%).

Если применять в качестве подложек монокристаллы танталата лития, то можно получить широкие полосы пропускания. Однако низкое значение добротности точечных резонаторов монокристаллических фильтров (на частоте 5 МГц добротность составляет порядка 5000) и низкая температурная стабильность (в интервале рабочих температур -60...85°C уход частоты может достигать 800 ppm) не позволяют изготавливать фильтры с высокой крутизной частотной характеристики затухания. Кроме того, для некоторых применений танталат лития непригоден из-за наличия пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических свойств.

Известен ряд работ по созданию гибридных монокристаллических фильтров на основе тетрабората лития [2,3]. Этот материал обладает достаточно большим коэффициентом электромеханической связи и частотной постоянной, он мог бы подойти для реализации высокочастотных пьезоэлектрических фильтров. Так, авторами были созданы макеты фильтров 4-го порядка,

А.Медведев, Р.Муртазин, Ю.Самсонов  
medvedev@newpiezo.com

которые состоят из четырех акустически связанных резонаторов, расположенных на одной пластине [4]. Но низкая температурная стабильность и отсутствие качественных кристаллов на российском рынке ограничивают применение тетрабората лития в пьезоэлектрических устройствах, работающих на ОАВ.

Уникальные свойства лантангаллиевого силиката, впервые синтезированного в России в начале 1980-х годов, позволяют создать новые типы фильтров для современной радиоэлектронной аппаратуры [5].

По величине коэффициента электромеханической связи лангасит занимает промежуточное положение между кварцем и танталатом лития и позволяет реализовывать фильтры в монокристаллическом исполнении с относительной шириной полосы пропускания до 0,8%. Наличие у лангасита температурных коэффициентов материальных констант (модулей упругости, пьезоэлектрических коэффициентов и т.д.) с противоположными знаками обуславливает наличие срезов с нулевым значением температурных коэффициентов частоты (ТКЧ) первого порядка.

Отсутствие фазовых переходов первого и второго рода вплоть до температуры плавления (1470°C), а также пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических эффектов (лангасит относится к точечной группе симметрии 32) открывает широкие возможности для высокотемпературных применений монокристаллов лангасита.

Лангасит – весьма технологичный материал в условиях промышленного производства. Во-первых, у лангасита нет энантиоморфных модификаций (пространственная группа симметрии R321), что особенно важно при первоначальной ориентировке кристалла перед резкой, если учесть, что искусственно выращенные кристаллы в направлении <001> представляют собой шестиугольные призмы. Во-вторых, будучи достаточно мягким материалом (твердость по Моосу 5,0–5,5), лангасит легко подвергается химическому травлению, а это необходимо при формировании обратных мезоструктур для высокочастотных пьезоэлектрических устройств.

Разработанная в ОАО "Фомос-Материалс" уникальная технология, гарантирующая высокое качество материала, позволяет выращивать монокристаллы лангасита методом Чох-

рального вдоль направлений  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 011 \rangle$  диаметром до 120 мм и массой около 7 кг (рис.1).

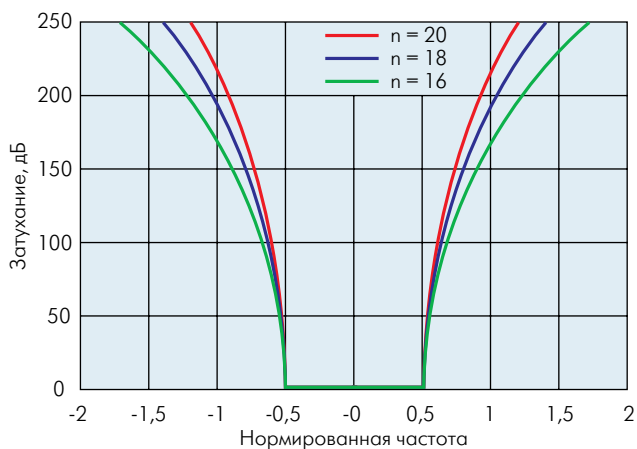
Разработчики ЗАО "Завод "Метеорит-Н" создали ряд уникальных монокристаллических фильтров на основе кристаллов лангасита для различной радиоэлектронной аппаратуры. С помощью современных методов анализа и синтеза фильтров можно теоретически рассчитать не только частотные, но и переходные и импульсные характеристики фильтров. Характерный пример синтеза фильтров – лангаситовый монокристаллический фильтр 20-го порядка с относительной шириной полосы пропускания 0,6 % [6].

Столь высокий порядок фильтра обусловлен жесткими требованиями к частотной характеристике затухания – коэффициент прямоугольности по уровням 60 и 6 дБ должен быть меньше 1,15. Этим требованиям удовлетворяет лангаситовый монокристаллический фильтр высокого порядка с Чебышевской характеристикой, обеспечивающей наибольшую крутизну скатов частотной характеристики затухания. Известные соотношения полинома Чебышева I-го рода были применены и при расчете характеристик фильтров 16-го, 18-го и 20-го порядков (рис.2).

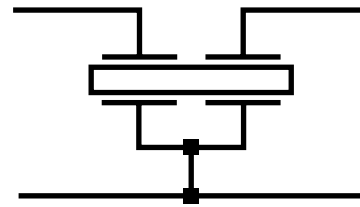
Анализ показывает, что для получения заданных электрических параметров с учетом температурной нестабильности и требований надежности необходимо проектировать фильтр



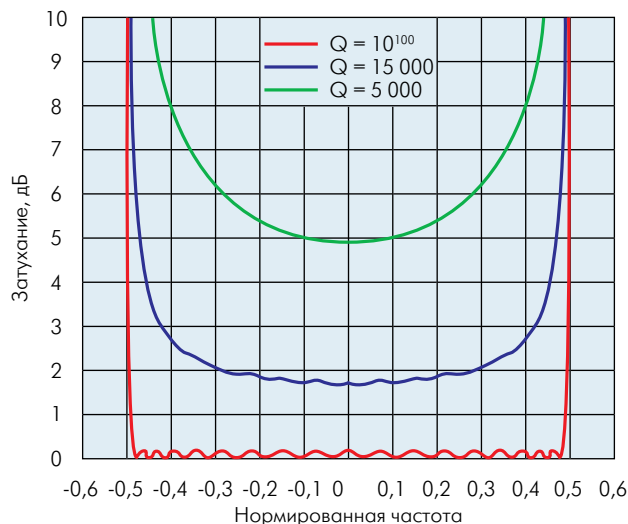
**Рис. 1. Монокристаллы лантангаллиевого силиката, выращенные на ОАО "Фомос-Материалс"**



**Рис.2. Частотные характеристики затухания при бесконечной добротности и неравномерности затухания в полосе пропускания фильтра 0,1 дБ**



**Рис.3. Монокристаллическое звено фильтра 20-го порядка**



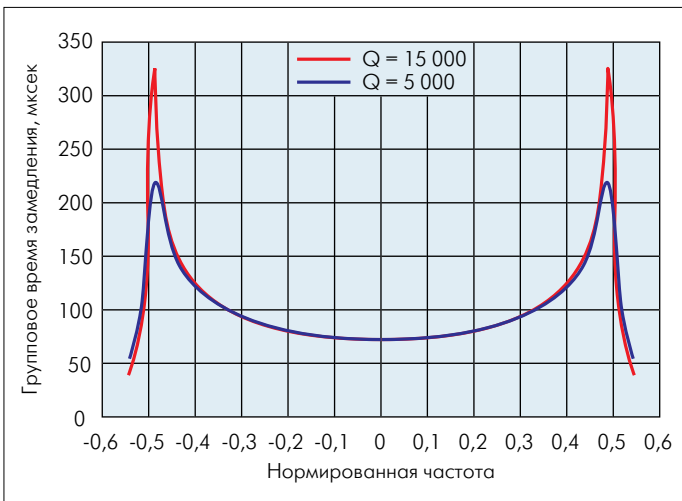
**Рис.4. Частотные характеристики затухания при различных значениях добротности**

20-го порядка. Фильтр реализуется на десяти монокристаллических звеньях, изготовленных на лангаситовых пластинах. Принципиальная электрическая схема звена изображена на рис.3. Связь между 10 звеньями фильтра – электрическая (емкостная).

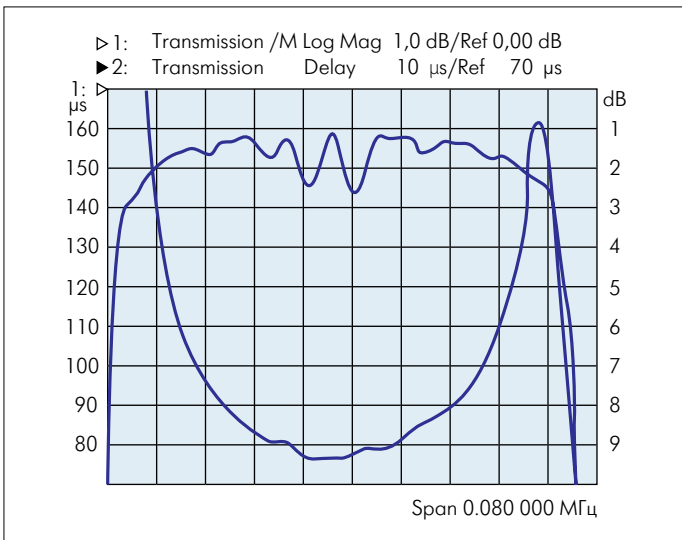
Для выбранного порядка проведен расчет затухания при различных значениях добротности точечных резонаторов "монокристаллической двойки". Наличие потерь в элементах фильтра приводит к существенному уменьшению ширины полосы пропускания и увеличению затухания в пределах полосы пропускания. Рассчитанная частотная характеристика затухания и групповое время задержки фильтра при различных значениях добротности показаны на рис. 4 и 5.

В ходе макетирования достигнуто хорошее соответствие между рассчитанными и измеренными электрическими параметрами фильтра. Экспериментальные характеристики лангаситового монокристаллического фильтра 20-го порядка представлены на рис.6, а габаритно-присоединительные размеры фильтра – на рис.7. Характеристики фильтра 20-го порядка: полоса обзора анализатора спектра – 80 кГц; вносимое затухание – не более 3,5 дБ; коэффициент прямоугольности по уровням 60 и 6 дБ – в пределах 1,09–1,14; значение ГВЗ на номинальной частоте 70–82 мкс.

Предложенный метод расчета применим при анализе фильтров не только 20-го, но и любого другого порядка. С помощью этого метода можно предсказать не только часто-



**Рис.5. Групповое время замедления при различных значениях добротности**



**Рис.6. Экспериментальные ЧХЗ и ГВЗ лангаситового монолитного фильтра 20-го порядка**

тные характеристики фильтра, но и временные характеристики, а именно – импульсную и переходную.

Созданные фильтры соответствуют требованиям действующего комплекса НТД, отраслевых, государственных и основополагающих стандартов, регламентирующих разработку соответствующих групп изделий. Можно утверждать, что это первое сообщение о результатах создания монолитных пьезоэлектрических фильтров 20-го порядка.

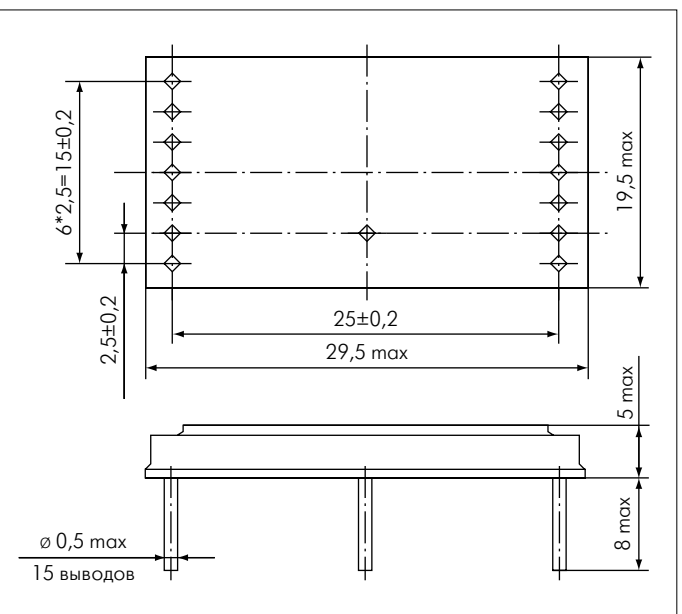
Высокая избирательность и минимальные искажения группового времени замедления на заданном участке полосы пропускания – противоречащие друг другу требования, предъявляемые к фильтру на номинальную частоту 10700 кГц с полосой пропускания 50 кГц по уровню 1 дБ. Разрешить эти противоречия, по мнению авторов, поможет фильтр 4-го порядка с характеристикой Лежандра (см. рис.3) [7]. Для добротности  $Q = 14000$ , реально измеренной на частом резонаторе монолитного звена, рассчитаны частотная характеристика затухания и групповое время замедления в полосе про-

пускания (рис.8).

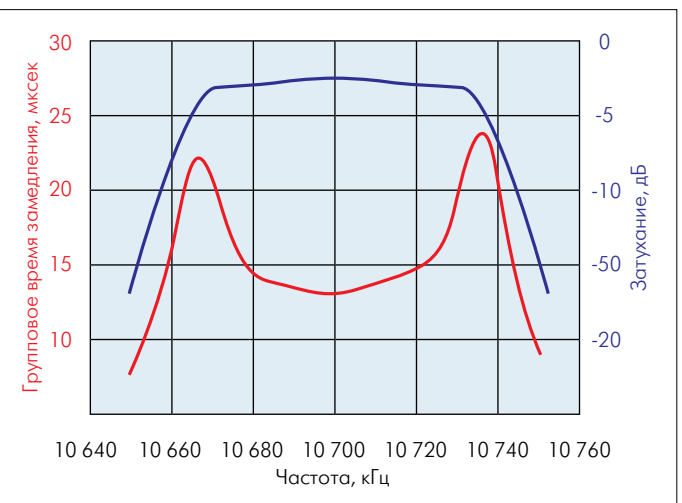
Фильтр реализован в виде двух "монолитных двоек" в корпусах типа UM-5. Связь между блоками электрическая (емкостная). Фильтр согласован на нагрузку 50 Ом. Экспериментальные характеристики фильтра представлены на рис.9.

Еще одним перспективным направлением реализации пьезоэлектрических фильтров на лангасите следует считать фильтры на основе лестничной математической модели [8]. Известны работы, в которых с целью улучшения параметров и многократного уменьшения габаритов LC-фильтры заменялись танталолитиевыми, реализованными по такой же схеме.

Лангаситовые резонаторы на пьезоэлементах полоскового типа в корпусе DW (в корпусе так называемого часового резонатора), возможность управления их динамическими параметрами и температурно-частотной характеристикой [9], высокие показатели по старению резонаторов, превосходящие соот-



**Рис.7. Габаритно-присоединительные размеры (в мм) лангаситового фильтра 20-го порядка**



**Рис.8. Расчетные частотные характеристики лангаситовых фильтров 4-го порядка с характеристикой Лежандра**

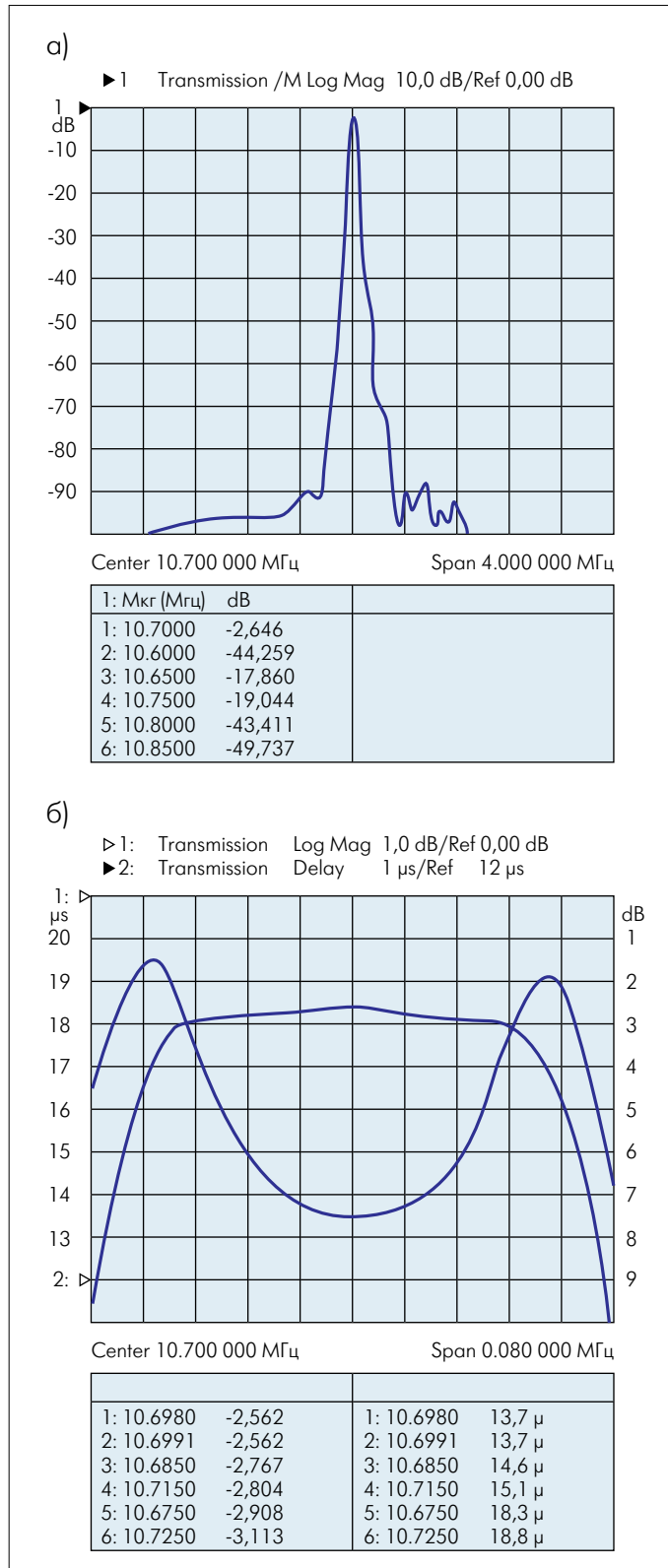
ветствующие кварцевые аналоги, открывают широкие возможности в области создания миниатюрных, высоконадежных пьезоэлектрических фильтров лестничной структуры.

Авторы надеются, что результаты, представленные в статье,

помогут потребителям и разработчикам фильтров оценить потенциал и перспективы применения лангаситовых фильтров в различной аппаратуре.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронникова и др. / Под ред. П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992.
2. Adashi M., Shiosaki T., Kobayashi H., Ohnishi O. and Kawabata A. "Temperature compensated piezoelectric Lithium Tetraborate Crystal for high Frequency SAW and BAW Device Application". – ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1985.
3. Самсонов Ю.А., Сахаров С.А., Медведев А.В., Блинов В.А. "Тетраборат лития новый пьезоэлектрический материал для пьезоэлектрических устройств на объемных акустических волнах (ОАВ)". – Материалы международной научно-технической конференции Пьезотехника-92. – С.-Петербург, 1992.
4. Муртазин Р.Р., Самсонов Ю.А. Малогабаритные монокристаллические фильтры 2, 4-го порядков на основе тетрабората лития с относительной шириной полосы пропускания (1,0 – 1,6) %. – Материалы научно-технической конференции ПЬЕЗО-2008, Москва, 2008.
5. Sakharov S.A., Larionov I.M., Medvedev A.V. "Application of langasite crystals in monolithic filters operation on shear modes". – 46 Annual Symposium on frequency control, ASFC, 1992, USA, p. 713–723.
6. Муртазин Р.Р., Самсонов Ю.А. Лангаситовый монокристаллический фильтр 20-го порядка с относительной шириной полосы пропускания 0,6%. – Материалы научно-технической конференции ПЬЕЗО-2008, Москва, 2008.
7. Муртазин Р.Р., Самсонов Ю.А. Лангаситовый монокристаллический фильтр Лежандра 4-го порядка с повышенными требованиями к искажению ГВЗ и избирательности на частоту 10,7 МГц шириной полосы пропускания 50 кГц (по уровню 1 дБ). – Материалы научно-технической конференции ПЬЕЗО-2008, Москва, 2008.
8. Муртазин Р.Р., Самсонов Ю.А. Миниатюрные лестничные лангаситовые фильтры. – Материалы научно-технической конференции ПЬЕЗО-2008, Москва, 2008.
9. Gruzinenco V.B., Medvedev A.V., Matsak A.N., Buzanov O.A. "Miniature BAW Resonators and Filters Based on Single Crystals of Strong Piezoelectrics". – IEEE International Frequency Control Symposium, 2003, p.654–656.



**Рис.9. Экспериментальные ЧХЗ и ГВЗ лангаситового фильтра 4-го порядка с характеристикой Лежандра: а) ЧХЗ при полосе обзора 4 МГц. Гарантированное затухание фильтра – более 80 дБ; б) ЧХЗ и ГВЗ в полосе пропускания фильтра (полоса обзора 80 кГц)**