

**Бакулин Е.М.^{1,2}, Строганов К.А.¹, Пащенко В.П.¹,
Калинин В.А.¹**

¹ОАО «Авангард»

²Санкт-Петербургский государственный университет

аэрокосмического приборостроения

Результаты разработки макетов пассивных МЭМС-ПАВ сенсоров с использованием пьезопленки оксида цинка

Приведены результаты моделирования макетов МЭМС-ПАВ сенсоров на слоистой структуре с использованием пьезопленки оксида цинка. Представлены результаты конечно-элементного анализа: построены дисперсионные характеристики скорости поверхностной акустической волны Рэлея и её второй гармоники, определена зависимость коэффициента электромеханической связи от относительной толщины пьезоэлектрика. Проанализированы различные типы акустоэлектронных устройств с целью выявления оптимального для применения в качестве МЭМС-ПАВ преобразователя, рассчитаны конструкционные параметры изделия, изготовлены и исследованы действующие лабораторные образцы на пластинах кремния с пьезопленкой оксида цинка.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, МЭМС, сенсоры, ПАВ-резонаторы, пьезоэлектрик.

Интеграция технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и акустоэлектроники (приборы на поверхностных акустических волнах – ПАВ) является перспективным направлением сенсорики, позволяющим расширить функциональные возможности датчиков физических величин. Применение таких датчиков актуально для систем управления транспортом, мониторинга зданий и сооружений в труднодоступных местах, мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах, где нет возможности использовать внешнее питание.

В настоящее время задача исследования и создания перспективных акустоэлектрических (акустоэлектронных) компонентов на ПАВ для различных областей применения, в том числе и для построения на их основе гибридных СВЧ устройств и устройств радиочастотной идентификации, управляемых МЭМС компонентами, является наукоемкой и весьма актуальной.

Как правило, классические малогабаритные акустоэлектронные СВЧ компоненты на ПАВ сегодня используются в решении радиотехнических задач при создании частото задающих генераторов СВЧ диапазона, создании полосно-пропускающих фильтров ПЧ и ВЧ диапазонов, а также линий задержек различных видов, в том числе и дисперсионных [1, 2]. Поставленная в настоящей работе задача исследования возможности использования классических акустоэлектрических компонентов в качестве пассивных модуляторов радиосигналов СВЧ диапазона совмещенных с МЭМС структурами является новой, открывающей новые горизонты применения технологии устройств на ПАВ и МЭМС.

Статья посвящена моделированию акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре с использованием пьезопленки оксида цинка на кремнии. Результаты моделирования используются для дальнейшей разработки и изготовления на вышеуказанной структуре чувствительного элемента на основе ПАВ устройства (резонатора). Моделирование выполняется с помощью конечно-элементного анализа.

Конструкция сенсора. Аналитическая модель сенсора на примере датчика ускорения представлена на рисунке 1. Следует отметить, что в зависимости от функционального назначения устройства (датчик давления, деформации, температуры и пр.), конструкция изделия может сильно меняться, а в настоящей работе для простоты и унификации в качестве эталонного рассматривается датчик линейных ускорений.

Конструкция акселерометра представляет из себя консоль треугольной формы [3] с напыленными на нее электродами, которые образуют встречно-штырьевой преобразователь, служащий для ввода и вывода электрической энергии. ПАВ устройство может быть выполнено либо в виде резонатора, либо линии задержки. Выводы ПАВ устройства соединяются с контактами антенны алюминиевой проволокой.

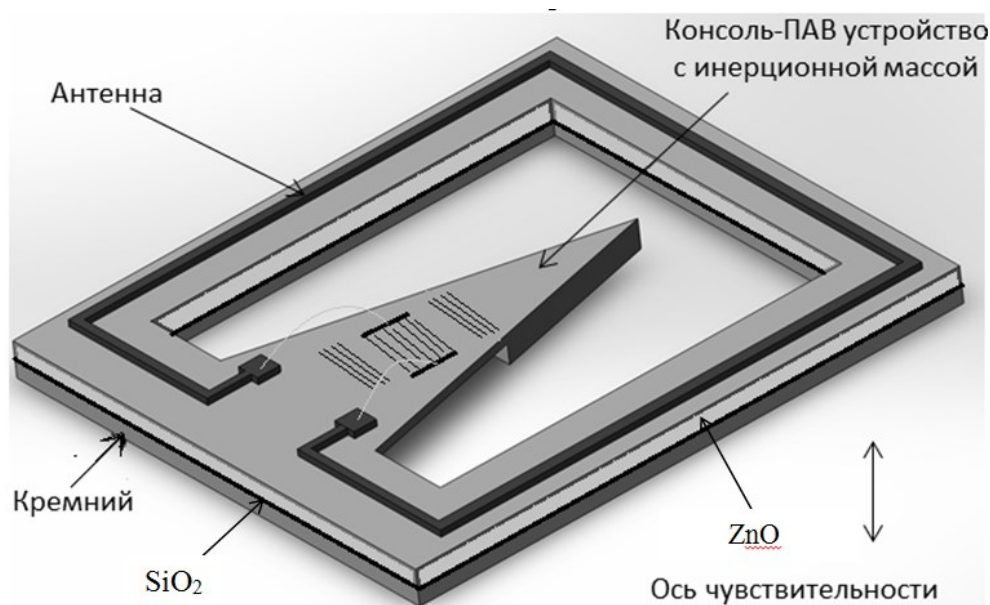


Рис. 1. Акселерометр МЭМС-ПАВ

Моделирование конструкции акселерометра. Расчет параметров пьезопленки проводился методом конечных элементов аналогично [4]. Далее был проведен расчёт синхронного резонатора с числом пар электродов в ВШП 60 плюс 1 дополнительный электрод. Число штырей в отражателях 60. Схематично топология резонатора представлена на рисунке 2.

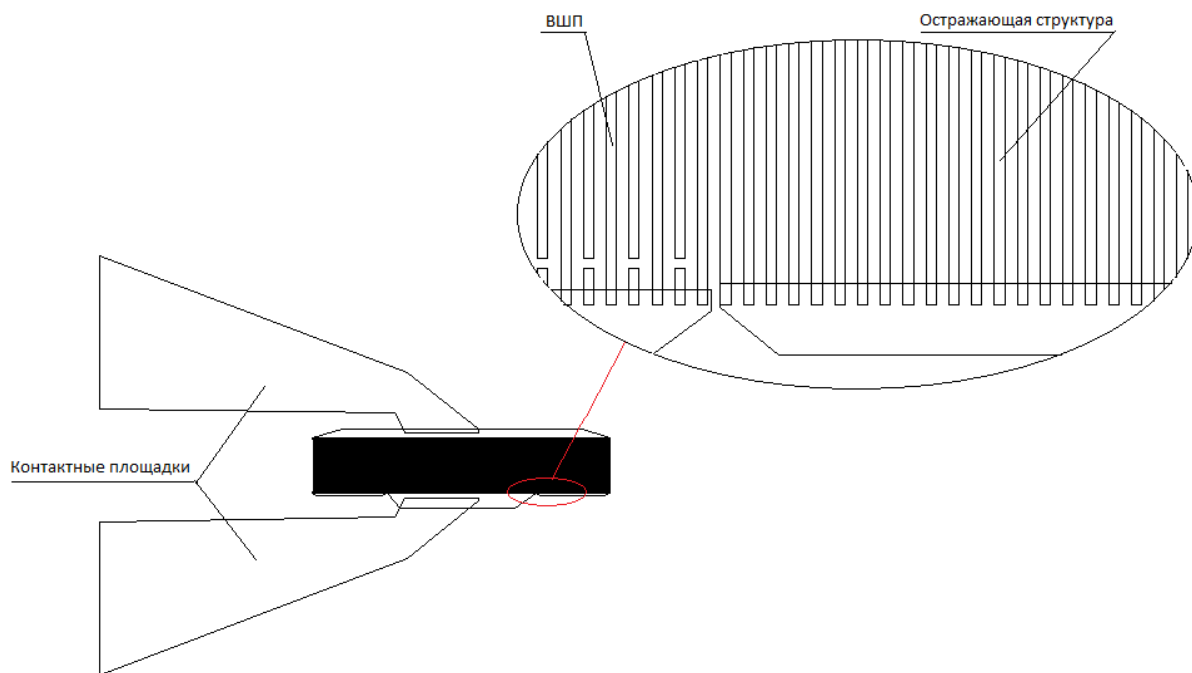


Рис. 2. Схематическое изображение топологии резонатора

Резонатор рассчитывался методом конечных элементов. По результатам расчетов были изготовлены необходимые фотошаблоны и макеты сенсоров.

Результаты измерения макетов. Изготовленные резонаторы для проведения измерений в зависимости от физического воздействия были смонтированы одним концом на кремниевую пластину с помощью клея К-300-61, другой конец резонаторов при этом оставался свободным – аналог консоли с инерционной массой акселерометра. Пластина-основание с резонаторами фиксировалась на измерительном столике с помощью вакуума во избежание влияние собственного изгиба на погрешность измерения резонаторов (рисунок 3).

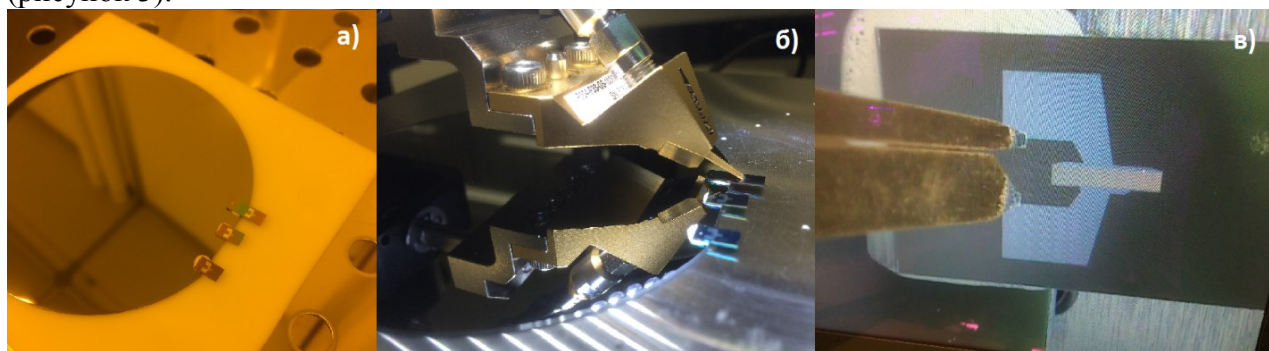


Рис. 3. Процесс измерения тестовых резонаторов, а) – общий вид тестовой пластины с резонаторами, б), в) – процесс измерения

Основной измеряемый параметр – резонансная частота изделия, уровень вносимых затуханий и добротность в данном случае представляет меньший интерес, они не анализируются. Процесс измерения проходил в два этапа:

- измерения характеристик ненагруженных резонаторов (в состоянии покоя);
- измерение характеристик нагруженных резонаторов (с грузом на свободном конце резонатора – обеспечение изгиба).

Следует отметить, что эксперимент ставил своей целью зафиксировать факт смещения резонансной частоты в нагруженном состоянии, макетные образцы не подвергались градуировке, а потому масса груза не регламентирована.

Результаты измерения резонаторов показали, что на АЧХ видна классическая резонансная картина с четким резонансным пиком. Смещение диаграммы Смита и искажение ее формы в данном случае объясняется неравномерностью пьезоэлектрической пленки. Наблюдается смещение резонансной частоты при появлении внешнего воздействия. Видно, что частота падает при появлении изгибающего напряжения, так как оно меняет период ВПП в большую сторону. При смене направления вектора приложенного усилия на противоположное смещение резонансной частоты происходило бы в большую сторону. Уровень отмеченного смещения – 0,08-0,4 МГц, что позволяет судить о принципиальной возможности построения высокоточного сенсора с хорошей чувствительностью.

В таблице 1 представлены более подробные данные об измеренных образцах.

Таблица 1 – Измеренные параметры резонаторов, закрепленных на пластине

Номер образца	f_{S11min} , МГц	f_R , МГц	R_r , Ом	Π , дБ	C_0 , пФ	Q_u	Δf , кГц	Δf_R , кГц
1	428,000	426,563	10,5	8,4	12,5	229	- 413	-26
1 с нагрузкой	427,587	426,537	10,4	8,4	12,2	220		
2	425,450	424,350	12,8	7,5	12,0	261	-75	-75
2 с нагрузкой	425,375	424,275	11,9	7,5	10,9	219		

Рабочая частота образцов оказалась существенно ниже расчетной (434 МГц). Это можно объяснить превышением толщины металлической пленки топологической структуры, а также наличием дефектов в пьезоэлектрической пленке.

Полученные образцы резонаторов были установлены в корпус КТ-94-2 (ТУ КЮЯЛ.432264.075) также на клей К-300-61 (рисунок 4), были измерены их характеристики (таблица 2).

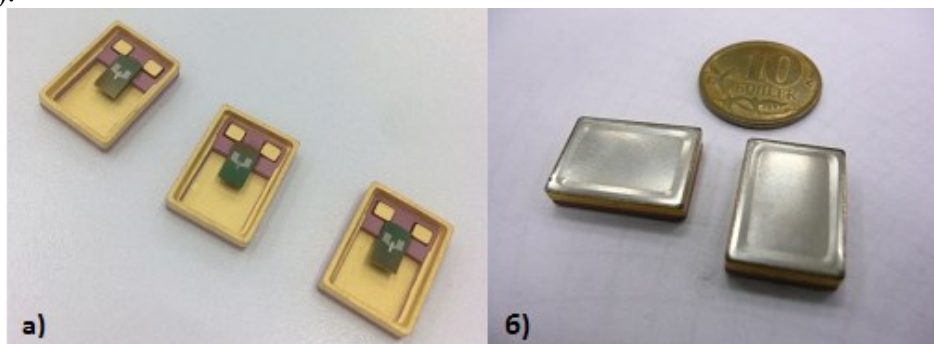


Рис. 4. Фото образцов в корпусе КТ-94-2

Таблица 2 – Измеренные параметры резонаторов в корпусе КТ-94-2

Номер образца	f_{S11min} , МГц	f_R , МГц	R_r , Ом	Π , дБ	C_0 , пФ	Q_u	Δf , кГц	Δf_R , кГц
1	425,036	423,402	9,7	10,6	18,9	108	-144	-39
1 с нагрузкой	424,892	423,363	9,7	10,1	17,2	126		
2	427,914	425,576	9,0	11,1	21,1	59	-265	-109

2 с нагрузкой	427,649	425,467	8,3	10,2	18,1	38		
3	425,775	423,885	9,2	10,6	19,5	135	-529	-168
3 с нагрузкой	425,246	423,717	9,1	9,7	17,2	130		

Экспериментально показано, что внешнее воздействие (давление) на исследуемые резонаторы вызывает фиксируемое смещение резонансной частоты, а значит, изделия МЭМС-ПАВ можно использовать в качестве сенсоров с частотным выходом для снятия показаний давления, линейного ускорения и подобных величин. Стоит учитывать, что, несмотря на контактные измерения в процессе эксперимента, исследуемые изделия можно опрашивать по радиоканалу при наличии специально рассчитанной антенны и модуля-считывателя.

При наличии унифицированной формы подвижной консоли можно значительно увеличить чувствительность изделий, а также провести градуировку параметров. Более тонкая консоль будет реагировать на меньшие воздействия, более толстая – на повышенные, таким образом, изменением конструкции можно варьировать чувствительностью и рабочим диапазоном измерений.

Заключение. Проведены численные расчеты акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на ниобате лития методом конечных элементов. Результаты указанных расчетов позволили определить оптимальное соотношение толщины пьезоэлектрической пленки к длине волны ПАВ для определенных значений КЭМС и скорости ПАВ. Полученное соотношение может быть использовано при разработке чувствительных элементов акселерометров с частотами ПАВ 434 МГц и 2,45 ГГц.

Датчики на основе интегрированной МЭМС-ПАВ технологии могут применяться в автомобильной промышленности, в авиации, в беспилотных летательных аппаратах, в навигации, в системах измерения деформации в труднодоступных местах, для мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах, где нет возможности использовать питание. Также такие сенсоры также могут применяться для интерактивного контроля за состоянием человека (кардиология, диагностика проблем опорно-двигательного аппарата).

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

Библиографический список

1. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ.— М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
2. Гуляев, Ю.В., Багдасарян А.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах: состояние и перспективы развития // Радиотехника.– 2003.– №8.– с.15 – 25.
3. Строганов К.А., Калинин В.А., Пащенко В.П. Преобразователь линейного ускорения консольного типа для эксплуатации в специальных условиях // Вопросы радиоэлектроники, 2012. Т. 1. № 1. С. 131-141.
4. Строганов К.А., Пащенко В.П., Калинин В.А., Бакулин Е.М., Нурмухамедов В.А. «Моделирование акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобат лития - кремний» // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2016 г.