

**Строганов К.А., Пащенко В.П., Бакулин Е.М.,
Овсов Д.А., Калинин В.А.**
ОАО «Авангард»

Моделирование сенсора по интегральной технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобата лития – кремний как элемента СВЧ микроэлектроники

Представлены результаты моделирования конструкции сенсора на слоистой структуре с монокристаллическим ниобатом лития: $YZ-LiNbO_3/SiO_2/Si(100)$. Приведены результаты конечно-элементного анализа, а именно: построены дисперсионные характеристики скорости ПАВ Рэлея, определена зависимость коэффициента электромеханической связи от относительной толщины пьезоэлектрика и построены графики температурной зависимости скорости ПАВ.

Ключевые слова: акустоэлектроника, микромеханика, сенсор, чувствительный элемент, МЭМС, ПАВ, резонатор, акселерометр, инклинометр, датчик температуры.

Интеграция технологий микросистемотехники (МЭМС) и акустоэлектроники (приборы на поверхностных акустических волнах – ПАВ) является перспективным направлением сенсорики, позволяющим расширить функциональные возможности сенсоров физических величин.

В предыдущих работах [1, 2] была рассмотрена конструкция чувствительного элемента датчика ускорения (акселерометр, инклинометр) представляющего собой ПАВ резонатор, выполненный на окисленной кремниевой подложке с нанесенной поверх тонкой пьезоэлектрической пленкой окиси цинка (ZnO). Недостатками такой конструкции являются: неоднородность структуры пленки по площади подложки, вызванное особенностями технологического процесса - при использовании реактивного магнетронного напыления углы наклона кристаллитов (кристаллографической оси С относительно нормали подложки) и толщины получаемой пленки имеют отличия в разных точках по площади поверхности, что в свою очередь влияет на коэффициент электромеханической связи (КЭМС) и частотные характеристики; поликристаллическая структура пленки, значительно увеличивающая вносимые акустические затухания. Характеристики приборов, полученных с применением таких тонкопленочных структур, трудно прогнозируемы, что напрямую влияет на коэффициент выхода годных изделий.

В настоящей статье в качестве конструкции сенсора была выбрана слоистая структура с монокристаллическим ниобатом лития: $YZ-LiNbO_3/SiO_2/Si(100)$ (Рис. 1), являющаяся коммерчески доступным материалом. Монокристаллическая пьезоэлектрическая пленка ниобата лития наносится на кремниевую подложку с оксидом кремния по технологии Smart Cut™ (см. Рис. 1) [3], позволяющей получать бездефектную равномерную структуру из различных материалов путем отделения пленки целевого материала через имплантированный в объем подложки слой ионов водорода. Преимущество этой конструкции – монокристаллическая пленка, высокий КЭМС и наличие оксидного слоя, снижающего температурную чувствительность ниобата лития.



Рис. 1. Слоистая структура YZ-LiNbO₃/SiO₂/Si(100).

В данной работе с целью разработки на вышеуказанной структуре ПАВ устройства (резонатора или линии задержки) с помощью конечно-элементного анализа были рассчитаны дисперсионные характеристики скорости ПАВ Рэлея и её первой гармоники – волны Сезавы в структуре ниобат лития/оксид кремния/кремний.

Уравнения распространения упругой волны в анизотропной пьезоэлектрической среде в тензорной форме имеют вид [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_{ik}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{где, } T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k, \quad D_i = \varepsilon_{ij} E_j + e_{ijk} S_{jk}, \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (2)$$

- тензор механического напряжения и вектор электрической индукции соответственно, U_i – компоненты вектора механического смещения, e_{ijk} – пьезоэлектрический тензор, C_{ijkl} – тензор модулей упругости среды, ε_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости, ρ - плотность среды

Тензор механической деформации:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

Вектор напряженности электрического поля, выраженный через скалярный потенциал φ :

$$E_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \quad (4)$$

Подставляем (3) и (4) в (2), а затем в систему (1), дифференцируем и получаем:

$$\begin{cases} C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_j \partial x_l} + e_{kij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \\ e_{ijk} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_k} - \varepsilon_{ij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \end{cases} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Граничные условия. На свободной поверхности подложки отсутствуют механические напряжения, вектор электрической индукции равен нулю:

$$T_{ij} \mathbf{n}_j \Big|_{H_{LNO}} = 0, \quad D_j \mathbf{n}_j \Big|_{H_{LNO}} = 0, \quad \mathbf{n} - \text{вектор нормали к поверхности, } (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

На границах между средами задаются непрерывность смещения, механического напряжения и электрической индукции; электрический заряд в непьезоэлектрических средах оксида кремния и кремний равен нулю:

$$\begin{cases} U_j|_{LNO} = U_j|_{SiO_2}; U_j|_{SiO_2} = U_j|_{Si}; \\ T_{ij}n_j|_{LNO} = T_{ij}n_j|_{SiO_2}; T_{ij}n_j|_{SiO_2} = T_{ij}n_j|_{Si}; \\ D_jn_j|_{LNO} = D_jn_j|_{SiO_2}; D_jn_j|_{SiO_2} = D_jn_j|_{Si} \\ \varphi|_{SiO_2} = 0, \varphi|_{Si} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Решения системы уравнений (5) для ПАВ ищут в виде парциальных волн, распространяющихся по поверхности и экспоненциально затухающих вглубь кристалла. Более подробно данный метод решения описан в [5 – 7].

При наличии сложной слоистой структуры, в которой распространяются ПАВ, решение системы (5) значительно усложняется. Необходимо решать систему в каждом слое, принимая во внимание, что в непьезоэлектрической анизотропной среде будут отсутствовать пьезоэлектрические компоненты, а также учитывать граничные условия (7), для чего применяется, например, метод переходных матриц [8]. Недостатком метода переходных матриц является то, что решения находятся в полубесконечной среде и невозможно оценить влияние электродов конечной ширины.

Для решения системы волновых уравнений (5) нами был использован метод конечных элементов, позволяющий учесть влияние слоев из различных материалов (изотропных и анизотропных, пьезоэлектрических). Решалась задача поиска собственных частот на одном периоде слоистой структуры YZ-LiNbO₃/SiO₂/Si(100) с алюминиевыми электродами. Скорость ПАВ определялась из соотношения $V_{ПАВ} = fr \cdot p$, где fr – частота резонанса, p – расстояние между центрами электродов, $\lambda = 2p$, где λ – длина волны ПАВ. Резонансная частота, соответствующая ПАВ, определялась по форме механических колебаний слоистой структуры, которое должно иметь эллиптическую форму. На рис. 2 показано механическое смещение, соответствующее рэлеевской ПАВ на частоте 2,45 ГГц.

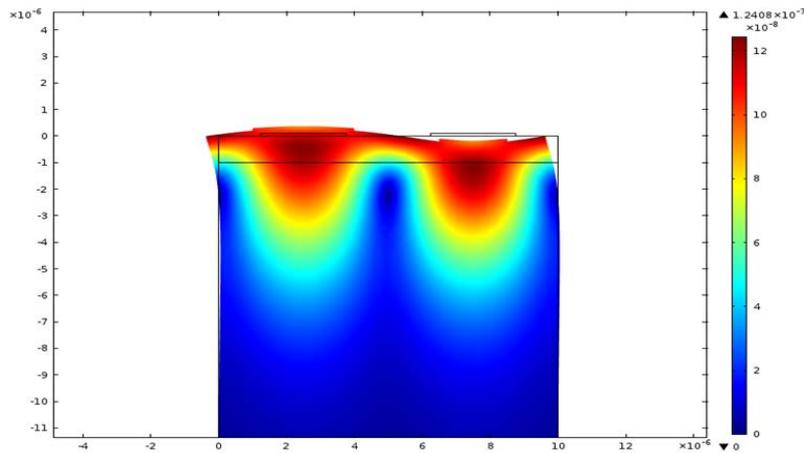


Рис. 2 - Профиль механического смещения волны на частоте 2,45 ГГц..

На следующем этапе аналогичным образом определялись собственные частоты ПАВ при изменении толщины пьезоэлектрической плёнки. По рассчитанным данным получена дисперсионная зависимость скорости ПАВ от соотношения h/λ (Рис.3), где h – толщина пьезоэлектрической пленки.

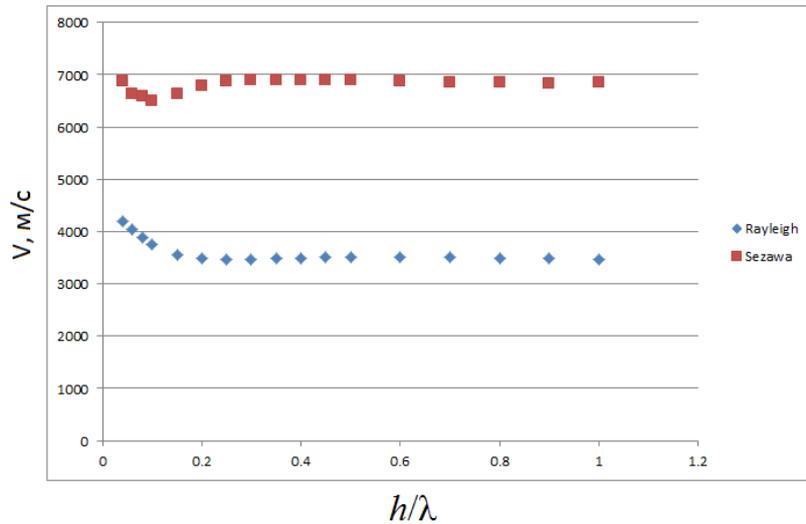


Рис. 3. Дисперсионные кривые рэлевской волны и волны Сезавы

Зависимость КЭМС от толщины (Рис. 4) определялась исходя из значений частот резонанса и антирезонанса: $\text{КЭМС} = \frac{\pi^2}{4} \frac{f_a - f_r}{f_a}$, где f_a, f_r - частоты антирезонанса и резонанса соответственно.

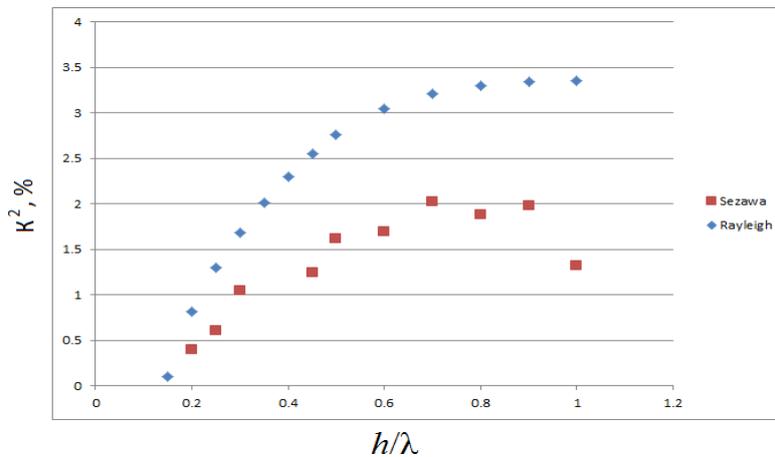


Рис. 4. Зависимость КЭМС от относительной толщины пьезоэлектрика

Из анализа графиков следует, что оптимальным для рэлеевской ПАВ является соотношение $h/\lambda = 0,6$, соответствующее скорости 3512 м/с и КЭМС ~ 3 %, так, например, для $f = 434$ МГц $h \sim 4,9$ мкм, а для $f = 2,45$ ГГц $h \sim 900$ нм. При данных значениях критический размер электродов равный $\lambda/4$, будет ~2 мкм и 0,36 мкм соответственно, что находится в пределах разрешающей способности современного литографического оборудования.

Температурная зависимость частоты ПАВ определялась аналогичным методом поиска собственных частот при различных значениях температуры. При этом изменялись упругие свойства материалов, которые рассчитывались отдельно и вводились в качестве материальных констант в расчетный модуль программного обеспечения. Температурные зависимости упругих коэффициентов ниобата лития взяты из [9]. По температурной зависимости скорости ПАВ определен температурный коэффициент частоты (ТКЧ)

слоистой структуры для волн Рэлея и Сезавы. Получено расчетное значение ТКЧ первого порядка $-41,3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, что согласуется с экспериментальными данными для аналогичной структуры, приведенным в работе [10].

Зная ТКЧ материала и самого сенсора можно учесть ее при калибровке и таким образом скомпенсировать влияние температуры. Также, исходя из данных о линейности ТКЧ, данный сенсор возможно использовать в качестве датчика температуры.

На рис. 5 приведена структура сенсора в разрезе для измерения ускорения.

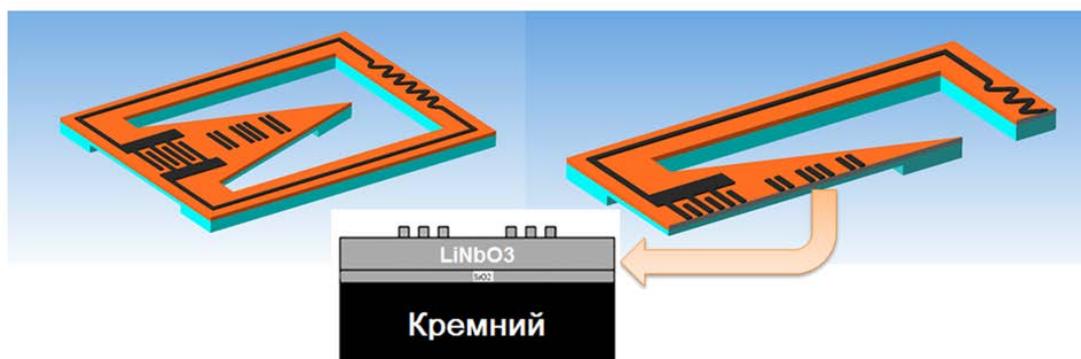


Рис. 5. Структура сенсора в разрезе.

По результатам проведенных численных расчетов сделан вывод о предпочтительном использовании данной слоистой структуры на ниобате лития, определено оптимальное соотношение толщины пьезоэлектрической пленки при разработке чувствительных элементов сенсоров физических величин.

Сенсоры на основе данной интегральной технологии планируется применять в системах управления транспортом и для мониторинга зданий и сооружений в труднодоступных местах, для мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах, где нет возможности использовать питание, для интерактивного контроля за состоянием человека при использовании специальных считывающих устройств.

Можно с уверенностью сказать, что синтез технологий акустоэлектроники и МЭМС является перспективным направлением в науке и технике.

Библиографический список

1. Строганов К.А., Материалы XXVII сессии Российского акустического общества, Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г., <http://rao.akin.ru/Rao/sess27строганов.pdf>
2. Строганов К.А., Сенсор на основе МЭМС+ПАВ технологии // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Сенсорика 2013», С. 34 – 35.
3. <http://www.soitec.com/en/technologies/smart-cut/>
4. Royer, D. Elastic waves in solids. Part I: Free and guided propagation [Text] / D. Royer, E. Dieulesaint. – Springer, 2000. – 374 p.
5. Auld, B.A. Acoustic fields and waves in solids [Text] / B.A. Auld. – New York, Wiley, Vol. 2, 1973. – 431 p.
6. Балакирев, М.К. Волны в пьезокристаллах [Текст] / М.К. Балакирев, И.А. Гилинский. – Новосибирск, Наука, 1982. – 240 с.
7. Бардзокас, Д.И. Распространение волн в электромагнитоупругих средах [Текст] / Д.И. Бардзокас, Б.А. Кудрявцев, Н.А. Сенник. – М., Едиториал УРСС, 2003. – 336 с.
8. Галисултанов, А.Т. Распространение поверхностной акустической волны в многослойной диэлектрической структуре с металлизацией на интерфейсе [Текст] / А.Т. Галисултанов, А.В. Осетров // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 3. – С. 79 – 86.
9. R.T.Smith, F.S.Welsh. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalite and lithium niobate. J.Appl.Phys. vol.42, pp.2219, 1971.
10. Ballandras, S. Oriented lithium niobate layers transferred on 4" (100) silicon wafer for RF SAW devices [Text] / S. Ballandras, B. Aspar, B. Biasse, W. Daniau, Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings, 2002 IEEE, Vol. 1, pp. 131 – 134.