

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОМЕХАНИКИ И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ НА СТРУКТУРЕ НИОБАТ ЛИТИЯ - КРЕМНИЙ

Бакулин Е.М.<sup>1</sup>, Строганов К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Бакулин Евгений Михайлович – инженер-технолог,  
отдел технологий изготовления изделий микросистемотехники;

<sup>2</sup>Строганов Кирилл Александрович – начальник сектора,  
сектор изделий функциональной электроники,  
ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург

**Аннотация:** приведены результаты моделирования акселерометра на слоистой структуре с монокристаллическим ниобатом лития:  $YZ-LiNbO_3/SiO_2/Si(100)$ . 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, рассчитан температурный коэффициент частоты слоистой структуры для волн Рэлея и Сезавы.

**Ключевые слова:** МЭМС, ПАВ, пьезоэлектроника, сенсоры физических величин.

## Введение

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 предыдущих работах [1, 2] была рассмотрена конструкция чувствительного элемента акселерометра, представляющего собой ПАВ резонатор, выполненный на окисленной кремниевой подложке с тонкой пьезоэлектрической пленкой окиси цинка ( $ZnO$ ). Недостатками такой конструкции являются: неоднородность структуры пленки по площади подложки и её поликристаллическая структура. Первый недостаток вызван особенностями технологического процесса – при использовании реактивного магнетронного напыления углы наклона кристаллитов (кристаллографической оси 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. Второй недостаток значительно увеличивает вносимые акустические затухания. Характеристики приборов, полученных с применением таких тонкопленочных структур, трудно прогнозируемы, что напрямую влияет на коэффициент выхода годных изделий.

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

Доклад посвящен моделированию сенсора на примере акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобат лития – кремний. Результаты моделирования используются для дальнейшей разработки на вышеуказанной структуре чувствительного элемента на основе ПАВ устройства (резонатора или линии задержки). Моделирование выполняется с помощью конечно-элементного анализа, рассчитываются дисперсионные характеристики скорости ПАВ Рэлея и её первой гармоники – волны Сезавы в структуре ниобат лития/оксид кремния/кремний.

## Конструкция акселерометра

Конструкция акселерометра представляет из себя консоль треугольной формы [4] 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. На рис. 1 условно показан исследуемый акселерометр.

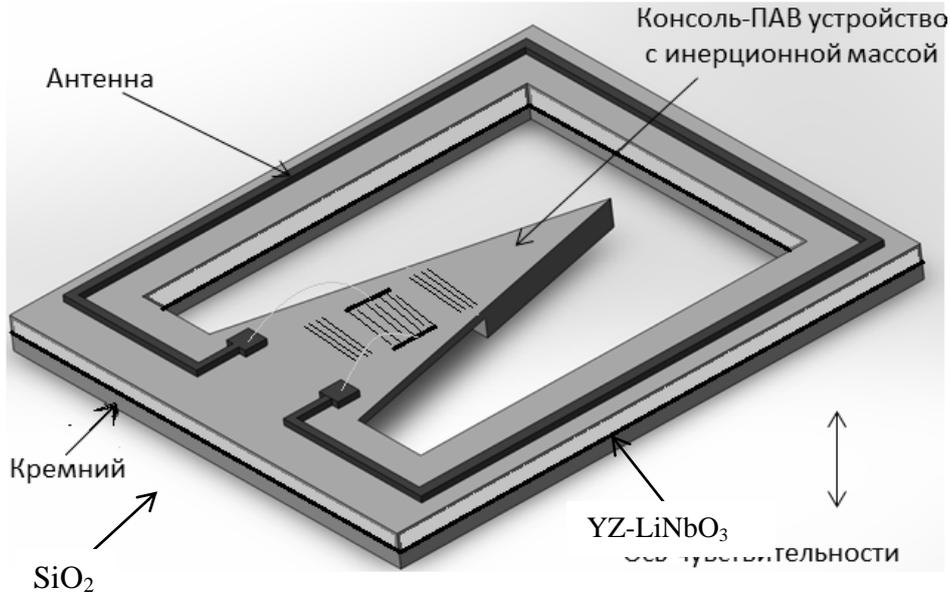


Рис. 1. Акселерометр МЭМС-ПАВ

Габариты антенн для различных частот будут отличаться, так например для патч антенны с частотой ПАВ 434 МГц на материале Флан-10 размеры составляют  $148 \times 110 \times 1$  мм, а с частотой 2,45 ГГц –  $27 \times 20 \times 1$  мм.

#### Моделирование конструкции акселерометра

Уравнения распространения упругой волны в анизотропной пьезоэлектрической среде в декартовой системе координат  $x_i$  в тензорной форме имеют вид [5]:

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

где  $T_{ij}$  – тензор механического напряжения;  $D_i$  – вектор электрической индукции;  $U_i$  – компоненты вектора механического смещения;  $\rho$  – плотность среды,  $x_i, x_k$  – координаты в декартовой системе, а  $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$  здесь и далее.

Тензор механического напряжения  $T_{ij}$  определяется из соотношения

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k, \quad (2)$$

где  $C_{ijkl}$  – тензор модулей упругости среды;  $S_{kl}$  – тензор механической деформации;  $e_{kij}$  – пьезоэлектрический тензор;  $E_k$  – вектор напряженности электрического поля.

Вектор электрической индукции  $D_i$  определяется из соотношения

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j + e_{ijk} S_{jk}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{ij}$  – тензор диэлектрической проницаемости.

Тензор механической деформации:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_k}{\partial x_i} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right). \quad (4)$$

Вектор напряженности электрического поля, выраженный через скалярный электрический потенциал  $\varphi$ :

$$E_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}. \quad (5)$$

Подставляем (4) и (5) в (2) и (3), а затем в систему (1), дифференцируем и получаем:

$$\begin{cases} C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial x_j \partial x_l} + e_{kij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \\ e_{ijk} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_k} - \epsilon_{ij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия для слоистой структуры  $YZ\text{-LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$  (рис. 2) следующие: на свободной поверхности подложки отсутствуют механические напряжения, все компоненты вектора электрической индукции равны нулю:

$$\begin{cases} T_{ij}n_j|_{H_{\text{LiNbO}_3}} = 0, \\ D_jn_j|_{H_{\text{LiNbO}_3}} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $n_j$  – вектор нормали к поверхности,  $H_{\text{LiNbO}_3}$  – толщина пьезоэлектрической пленки  $\text{LiNbO}_3$ .

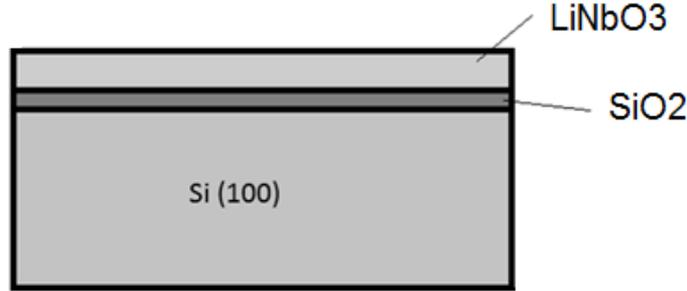


Рис. 2. Слоистая структура  $YZ\text{-LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$

На границах между средами принимается, что механическое смещение, механическое напряжение и электрическая индукция непрерывны, а электрический заряд в непьезоэлектрических средах оксида кремния и кремния равен нулю:

$$\begin{cases} U_j|_{H_{\text{LiNbO}_3}} = U_j|_{\text{SiO}_2}; U_j|_{\text{SiO}_2} = U_j|_{\text{Si}}; \\ T_{ij}n_j|_{H_{\text{LiNbO}_3}} = T_{ij}n_j|_{\text{SiO}_2}; T_{ij}n_j|_{\text{SiO}_2} = T_{ij}n_j|_{\text{Si}}; \\ D_jn_j|_{H_{\text{LiNbO}_3}} = D_jn_j|_{\text{SiO}_2}; D_jn_j|_{\text{SiO}_2} = D_jn_j|_{\text{Si}}; \\ \phi|_{\text{SiO}_2} = 0, \phi|_{\text{Si}} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Решение системы уравнений (6) для ПАВ ищут в виде парциальных волн, распространяющихся по поверхности и экспоненциально затухающих вглубь кристалла. Более подробно данный метод решения описан в [6 – 8].

При наличии сложной слоистой структуры, в которой распространяются ПАВ, решение системы (6) значительно усложняется. Необходимо решать систему в каждом слое, а также учитывать граничные условия (8), для чего применяется, например метод переходных матриц [9]. Недостатком этого метода является то, что решения находятся в полубесконечной среде и невозможно оценить влияние электродов конечной ширины.

Для решения системы волновых уравнений (6) использован метод конечных элементов, позволяющий учесть влияние слоев из различных материалов (изотропных, анизотропных, пьезоэлектрических). Решалась задача поиска собственных частот на одном периоде слоистой структуры  $YZ\text{-LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$  с алюминиевыми электродами. Скорость ПАВ определялась из соотношения

$$V_{\text{ПАВ}} = f_r \cdot 2 \cdot p, \quad (9)$$

где  $f_r$  – резонансная частота ПАВ в слоистой структуре,  $p$  – расстояние между центрами электродов, задаваемое топологией структуры и равно:  $p = \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны ПАВ.

Соответствие резонансной частоты рэлеевской ПАВ определялось по виду механических смещений слоистой структуры, которое должно иметь эллиптическую форму. На рис. 3 показано механическое смещение соответствующее рэлеевской ПАВ на частоте 800 МГц.

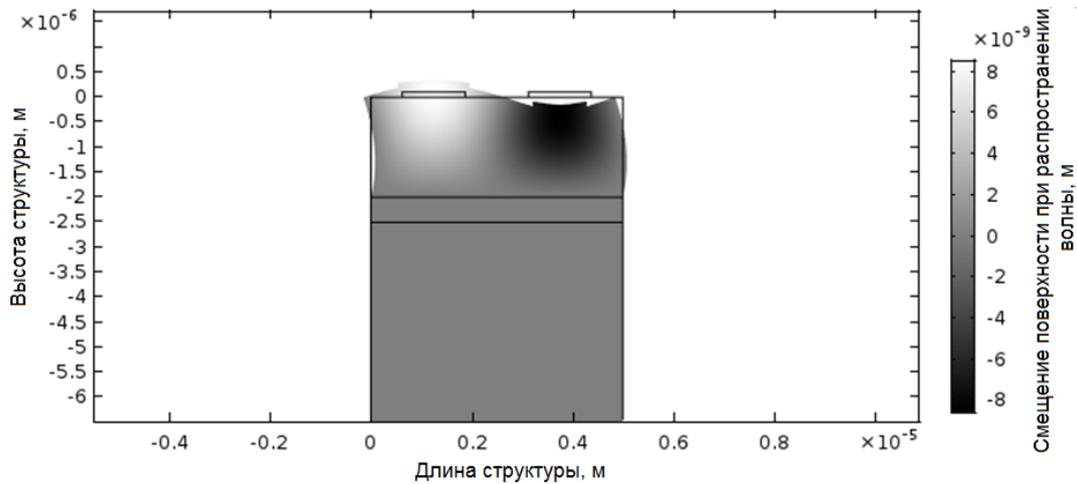


Рис. 3. Профиль механического смещения волны на частоте 800 МГц

На следующем этапе аналогичным образом определялись собственные частоты ПАВ при изменении толщины пьезоэлектрической плёнки. По рассчитанным данным получена дисперсионная зависимость скорости ПАВ от соотношения  $H_{LiNbO_3}/\lambda$  (Рис.4). На графике приведены две кривые, соответствующие рэлеевской ПАВ и её первой гармоники – волны Сезавы. Для работы на частотах свыше 2 ГГц в ПАВ приборах может быть использована волна Сезавы. Благодаря её высокой скорости, критический размер топологии электродов (равный  $\lambda/4$ ) остается в пределах  $0,5 \div 1$  мкм.

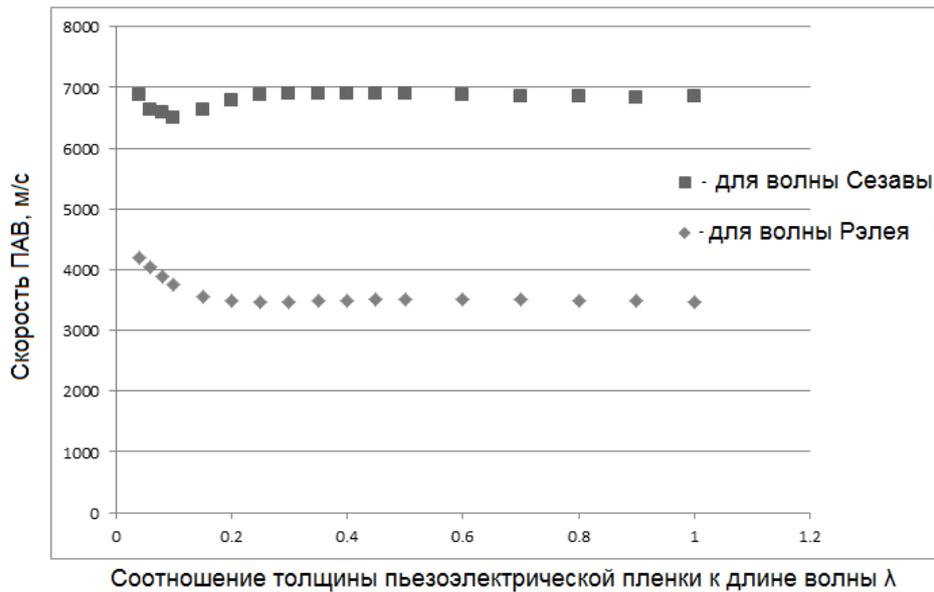


Рис. 4. Дисперсионные кривые рэлеевской волны и волны Сезавы

Зависимость квадрата КЭМС  $k^2$  от толщины (Рис. 5) определялась исходя из значений частот резонанса и антирезонанса [5]:

$$k^2 = \frac{\pi^2}{4} \frac{f_a - f_r}{f_a}, \quad (10)$$

где  $f_a$  – антирезонансная частота ПАВ в слоистой структуре.

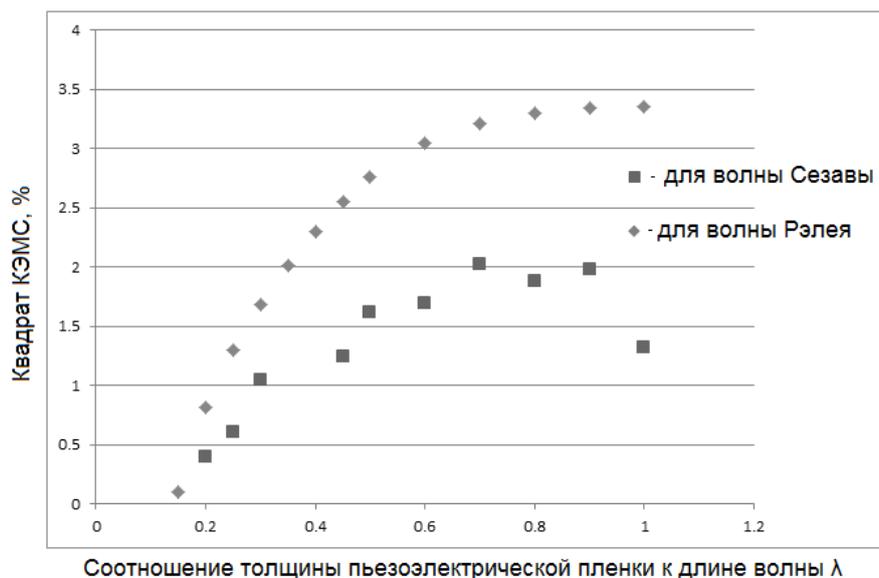


Рис. 5. Зависимость КЭМС от относительной толщины пьезоэлектрика

Для достижения требуемых характеристик предложенного акселерометра, необходимо учитывать следующие основные факторы:

- 1) значение КЭМС должно быть максимально большим для обеспечения эффективного преобразования электрического сигнала в ПАВ;
- 2) минимальный топологический размер электродов должен быть в пределах разрешающей способности фотолитографического оборудования (0,3 мкм);
- 3) частота ПАВ устройства не должна изменяться при воздействии температуры.

Из анализа графиков следует, что оптимальным для рэлеевской ПАВ, является соотношение толщины пьезоэлектрического слоя к длине волны ПАВ  $H_{LiNbO_3}/\lambda = 0,6$ . При этом значении скорость ПАВ равна 3512 м/с и  $k^2 \sim 3\%$ . Так, например, для волны с частотой  $f = 434$  МГц толщина  $H_{LiNbO_3} \sim 4,9$  мкм, а для  $f = 2,45$  ГГц –  $H_{LiNbO_3} \sim 0,9$  мкм, критический размер электродов равный  $\lambda/4$ , будет составлять  $\sim 2$  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 рассчитывалась зависимость упругих и пьезоэлектрических коэффициентов материалов, которые вводились в расчетный модуль программного обеспечения на каждой итерации. Температурные зависимости упругих коэффициентов ниобата лития взяты из [10]. По рассчитанной температурной зависимости скорости ПАВ определен температурный коэффициент частоты слоистой структуры для волн Рэлея и Сезавы. Получено расчетное значение указанного коэффициента – 41,3 ppm/°C, что согласуется с экспериментальными данными для аналогичной структуры, приведенным в работе [11].

Зная температурные коэффициенты частоты материала и самого акселерометра можно учесть их при калибровке и таким образом скомпенсировать влияние температуры. Также, исходя из данных о линейности температурного коэффициента частоты, разрабатываемый акселерометр возможно использовать в качестве датчика температуры.

На основании проведенного моделирования и данных [4] проведена оценка основных характеристик МЭМС-ПАВ акселерометра и сравнение их с аналогами. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики МЭМС-ПАВ акселерометра и сравнение с аналогами

Наименование Характеристики и размерность	Значение характеристики			
	Характерис- тики МЭМС- ПАВ акселерометра	Honeywell JTF AG111, AG112, AG113	Analog Device (ADXL001, ADXL003, ADXL105, ADXL202, ADXL278 и др.)	Freescale (MMA6231 Q, MMA7340L, MMA1213, MMA3202, MMA2300 и др.)

Диапазоны измерений линейных ускорений, g	до $\pm 1g$ , $\pm 5g$ , $\pm 10g$ , $\pm 50g$ , $\pm 200g$	от $\pm 5$ до $\pm 200$	от $\pm 1,7$ до $\pm 500$	от $\pm 1,5$ до $\pm 250$
Температура окружающей среды, $^{\circ}C$	от -40 до +85	от -40 до +120	от -40 до +85 (в диапазоне до 10 g) от -40 до +105 (в диапазоне до 500 g)	от -40 до +85 (в диапазоне до 15 g) от -40 до +125 (в диапазоне до 500 g)
Масса, г	<b>5</b>	от 30 до 60	20	20
Габариты, мм	<b>10×5×2</b>	Ø25×20	15×10×10	15×10×5
Возможность съема информации по радиоканалу + работа без электропитания	+	-	-	-

По результатам анализа конкурентных характеристик видно, что МЭМС-ПАВ акселерометр по ряду параметров находится на уровне мировых аналогов, а по возможности съема информации по радиоканалу и работы без электропитания – выигрывают у конкурентов.

#### 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.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.*

#### Список литературы

1. *Строганов К.А.* Материалы XXVII сессии Российского акустического общества. Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rao.akin.ru/Rao/sess27строганов.pdf> (дата обращения: 10.05.2017).
2. *Строганов К.А.* Сенсор на основе МЭМС+ПАВ технологии // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Сенсорика 2013». С. 34–35.
3. Smart Cut™ technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.soitec.com/en/technologies/smart-cut/> (дата обращения: 28.04.17).
4. *Строганов К.А.* Преобразователь линейного ускорения консольного типа для эксплуатации в специальных условиях // В.А.Калинин, К.А. Строганов, В.П. Пашенко. Вопросы радиоэлектроники, 2012. Т. 1. № 1. С. 131-141.
5. *Royer D.* Elastic waves in solids. Part I: Free and guided propagation [Text] / D. Royer, E. Dieulesaint. Springer, 2000. 374 p.
6. *Auld B.A.* Acoustic fields and waves in solids [Text] / B.A. Auld. New York, Wiley. Vol. 2, 1973. 431 p.
7. *Балакирев М.К.* Волны в пьезокристаллах [Текст] / М.К. Балакирев, И.А. Гишинский. Новосибирск, Наука, 1982. 240 с.
8. *Бардзокас Д.И.* Распространение волн в электромагнитоупругих средах [Текст] / Д.И. Бардзокас, Б.А. Кудрявцев, Н.А. Сенник. М. Едиториал УРСС, 2003. 336 с.
9. *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.
10. *Smith R.T., Welsh F.S.* Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalite and lithium niobate. J. Appl. Phys. Vol. 42. Pp. 2219, 1971.
11. *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.