

УДК 534.8:62–94

Е. С. Грибкова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

О возможности использования особенностей распространения поверхностных акустических волн в датчиках параметров движения

Рассмотрена задача распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в анизотропной твердой среде при наличии ее вращения. На основе теоретического и численного анализа найдены характеристики ПАВ, которые могут служить информативным признаком при определении угловой скорости вращения. Предложены новые конструкции чувствительных элементов гироскопов на ПАВ.

Поверхностные акустические волны, анизотропная твердая среда, неинерциальная система отсчета, датчики параметров углового движения

Современные задачи проектирования гидроакустических станций особого назначения для предупреждения чрезвычайных ситуаций предъявляют к созданию устройств ориентации и навигации, входящих в их состав, ряд специфических требований, связанных с возможностью устойчивой работоспособности в сложных условиях. В связи с этим по-прежнему актуальным остается вопрос поиска новых принципов построения датчиков параметров движения для навигационных систем, которые удовлетворяли бы предъявляемым требованиям.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию возможности построения чувствительных элементов датчиков параметров движения на базе акустических колебаний, в частности поверхностных акустических волн (ПАВ). Существующие и наиболее широко применяемые микромеханические датчики не являются твердотельными, поскольку содержат в конструкции набор упругих подвесов, обеспечивающих необходимые степени свободы инерционным элементам, что ограничивает ударопрочность и виброустойчивость чувствительных элементов, с одной стороны, и требует использования сложных технологий – с другой. Поэтому представляется перспективным переход к твердотельным сенсорам движения, которые в качестве информативного сигнала использовали бы непосредственно инерциальные свойства упругих волн в твердой среде.

В связи с этим актуальной задачей является исследование и анализ особенностей акустических волн в условиях наличия вращения среды распространения. В основу принципа функционирования существующих прототипов чувствительных элементов гироскопов на ПАВ [1]–[5]

положена зависимость скорости распространения поверхностной акустической волны от угловой скорости вращения звукопровода. Альтернативным способом является регистрация возникающих при вращении так называемых вторичных волн с направлением распространения, отличным от направления первичной ПАВ, что реализуется с помощью отражающих структур [1], [2] либо за счет рассеяния первичной ПАВ на колеблющихся массах [3], [4]. Несмотря на существование ряда работ, посвященных этому вопросу, развитие данного направления активно продолжается, что связано с существенной сложностью выделения информативного сигнала, связанного с вращением, на фоне помех, из-за зависимости характеристик ПАВ от множества внешних факторов.

Научный поиск новых решений в данной области проводится в последние годы на кафедре ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [6], [7], где работы ведутся в направлении исследования возможности использования особенностей распространения ультразвуковых волн для построения твердотельных датчиков параметров движения. В отличие от известных работ проведенные коллективом кафедры исследования позволили предложить новую концепцию построения датчика углового движения на ПАВ, в основу которой положено влияние на характеристики ПАВ направления распространения волны и ориентации звукопровода в пьезокристаллах, а также его изменение в условиях вращения.

Задача распространения ПАВ при наличии вращения решается на базе известных теоретических соотношений [5] с учетом появления центробежного ускорения и ускорения Кориолиса,

что изменяет вид уравнения движения по сравнению с классическим инерциальным случаем, приводя совместно с уравнением пьезоэффекта к системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} &\rho \left(\frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} + 2(\epsilon_{ink} \Omega_n) \frac{\partial \xi_k}{\partial t} + (\Omega_i \Omega_k \xi_k - \Omega_k \Omega_k \xi_i) \right) = \\ &= C^E_{iklm} \frac{\partial^2 \xi_m}{\partial x_k \partial x_l} + e_{jik} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_k}; \\ &e_{prs} \frac{\partial^2 \xi_s}{\partial x_p \partial x_r} - \epsilon^u_{pq} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_p \partial x_q} = 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Система уравнений (1) имеет ненулевые решения в виде линейной комбинации плоских гармонических волн, если ее определитель равен нулю:

$$\det \begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho V^2 & \Gamma_{12} + 2j\rho V^2 W_3 & \Gamma_{13} - 2j\rho V^2 W_2 & \gamma_1 \\ \Gamma_{12} - 2j\rho V^2 W_3 & \Gamma_{22} - \rho V^2 & \Gamma_{23} + 2j\rho V^2 W_1 & \gamma_2 \\ \Gamma_{13} + 2j\rho V^2 W_2 & \Gamma_{23} - 2j\rho V^2 W_1 & \Gamma_{33} - \rho V^2 & \gamma_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \end{bmatrix} = 0, \quad (2)$$

где $W_i = \Omega_i/\omega$ – относительная угловая скорость вращения $\Omega_i/\omega \ll 1$, ω – угловая частота;

$\Gamma_{im} = C^E_{iklm} l_k l_l$, $\gamma_i = e_{jkl} l_j l_k$, $\gamma_4 = -\epsilon^u_{pq} l_p l_q$, C_{iklm} , e_{jik} , ϵ_{pq} – тензор s модулей упругости, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных соответственно; ρ – плотность среды; φ – электрический потенциал; ϵ_{ink} – тензор Леви-Чивита.

На основании (2) можно получить зависимости между скоростью распространения волны v вдоль границы и компонентами направляющих косинусов l_i . Уравнения, описывающие поверхностную волну, таким образом, имеют вид

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_i &= \sum_{n=1}^4 A^{(n)} p_i^{(n)} \exp \left[-jk (l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3 - vt) \right], \\ \varphi &= \sum_{n=1}^4 A^{(n)} p_4^{(n)} \exp \left[-jk (l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3^{(n)} x_3 - vt) \right], \end{aligned} \right. \quad (3)$$

При этом искомые параметры поверхностной волны $A^{(n)}$, $p_i^{(n)}$, $l_3^{(n)}$ и v должны удовлетворять также граничным условиям, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомых амплитуд, решение которой нетривиально при равенстве нулю определителя.

Таким образом, рассматриваемая задача расчета ПАВ заключается в нахождении таких значений $A^{(n)}$, $p_i^{(n)}$, $l_3^{(n)}$ и v , удовлетворяющих

уравнениям (2) и (3) для заданных условий распространения, которые определяются кристаллографическим срезом пьезоэлектрического материала, направлением распространения волны в нем и угловой скоростью вращения звукопровода.

Исследование распространения поверхностных волн в пьезокристаллах, проводимое с помощью разработанной специализированной программы численного анализа характеристик ПАВ, позволило найти в ряде материалов такие срезы и направления, где при отсутствии вращения звукопровода акустическая волна не сопровождается волной электрического потенциала [6], [7].

На рис. 1 и 2 показаны кривые угловых зависимостей изменения скорости ПАВ за счет

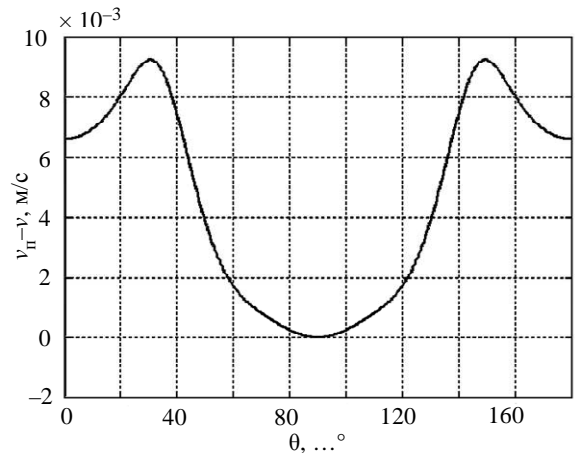


Рис. 1

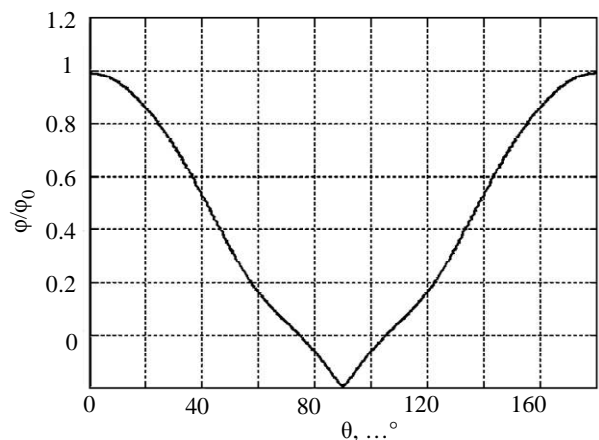


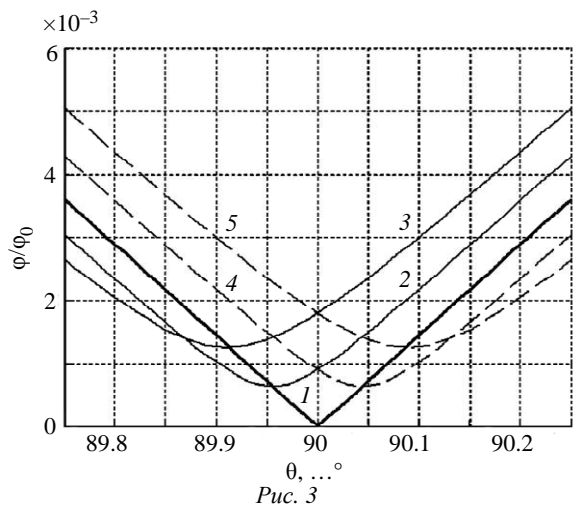
Рис. 2

пьезоэффекта $v_{\Pi} - v$ и нормированного электрического потенциала φ/φ_0 для Y-среза пьезокварцевого

звукопровода соответственно, где φ – амплитуда волны электрического потенциала для заданного направления, отнесенная к некоторой амплитуде смещения; φ_0 – аналогичная величина для волны, распространяющейся по поверхности звукопровода ST-среза, отнесенная к той же амплитуде смещения. В обоих случаях можно говорить о наличии «непьезоэлектрического» направления, соответствующего углу Эйлера $\theta = 90^\circ$.

Дальнейшее моделирование выявило ряд срезов и направлений в пьезокварце, где распространение ПАВ при отсутствии вращения не сопровождается электрическим полем. С точки зрения аналитического описания, как показал проведенный анализ, «непьезоактивные» направления связаны с особым видом определителя системы уравнений Грина–Кристоффеля (2), когда он разделяется на две независимые системы, соответствующие непьезоактивной волне Рэлея и волне Гуляева–Блюштейна. При этом, что важно, в условиях вращения звукопровода компоненты тензора Грина–Кристоффеля изменяются и система перестает разбиваться на две независимые, а электрический потенциал становится необходимой составляющей решения для поверхностной волны.

Результаты численного моделирования подтвердили важный с точки зрения практического применения факт возникновения при появлении вращения электрического поля в «непьезоэлектрических» направлениях, пропорционального угловой скорости. На рис. 3 показаны угловые зависимости относительной величины электрического потенциала при разных скоростях вращения звукопровода вокруг направления распространения ПАВ ($W_1 = 0; \pm 0.001; \pm 0.002$). При этом для выявления



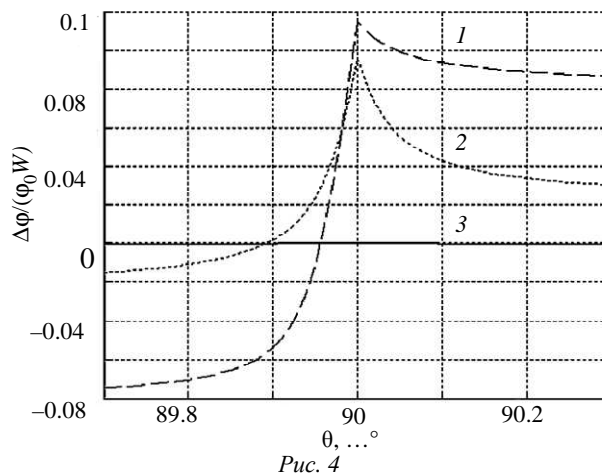
направления вращения необходимо анализировать фазу возникающего сигнала. Существенной с точки зрения возможности дальнейшего применения является линейность зависимости потенциала $\Delta\varphi/\varphi_0$ от скорости вращения W для практически реализуемых случаев ($W < 0.001$).

На рис. 4 показана зависимость изменения электрического поля $\Delta\varphi/(\varphi_0 W)$ от направления распространения ПАВ при вращении вокруг различных осей X_1, X_2, X_3 (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Можно видеть, что для выявления оси вращения в общем случае потребуется три чувствительных элемента датчиков с известной взаимной ориентацией осей и соответствующая программа постобработки результатов измерений.

Стоит отметить, что отличительной особенностью выявленных в монокристаллическом пьезокварце «непьезоактивных» направлений является постоянство скорости ПАВ при низких скоростях вращения звукопровода ($W < 0.001$), которые реализуются в подавляющем большинстве практических случаев, что важно с точки зрения построения чувствительных элементов гироскопов.

В работе также проводились исследования по поиску «непьезоактивных» направлений в других материалах. Анализ характеристик поверхностных волн показал отсутствие «непьезоэлектрических» направлений в LiNbO_3 и их наличие в кристаллах CdS , при этом величина изменения потенциала от вращения на порядок больше, чем в кварце, что делает сульфид кадмия перспективным материалом для дальнейших исследований.

В настоящее время в рамках данной работы ведется аналогичное исследование семейства монокристаллов сложных оксидов, таких как лангасит



LGS, ланганит LGN и лангитат LGT, характеристики которых превосходят по ряду параметров ранее известные материалы, что открывает широкие возможности для их применения в качестве материала звукопровода сенсорных элементов на ПАВ.

Результаты проведенных теоретического и численного анализа особенностей распространения ПАВ в пьезокристаллах позволили предложить возможные способы использования выявленных эффектов в датчиках параметров углового движения, которые были бы лишены ряда недостатков, связанных со сложностью конструкции и процесса выявления информативного сигнала [8], [9]. Схемы конструктивной реализации предложенных чувствительных элементов на ПАВ показаны на рис. 5 и 6. Оба подхода основываются на регистрации приемным преобразователем электрического поля, сопровождающего ПАВ, при этом величина детектируемого сигнала пропорциональна скорости вращения. Первый способ реализуется с помощью переотражения ПАВ в «непьезоактивное» направление, второй – с помощью регистрации распространяющейся непосредственно в «непьезоэлектрическом» направлении ПАВ в условиях наличия вращения.

Использование в качестве информативного сигнала непосредственно изменения электрического потенциала, сопровождающего распространение ПАВ и пропорционального угловой скорости вращения, делает принципиально возможным

его устойчивое выявление. Что, безусловно, говорит о перспективности развития данного направления, в частности, применительно к современным задачам проектирования гидроакустических станций особого назначения для предупреждения чрезвычайных ситуаций, предъявляющих к созданию устройств ориентации и навигации, входящих в их состав, ряд специфических требований, связанных с возможностью устойчивой работоспособности в сложных условиях.

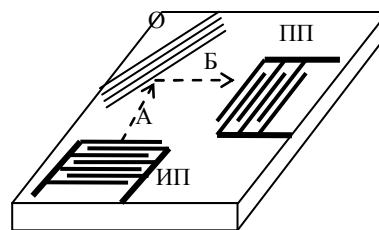


Рис. 5

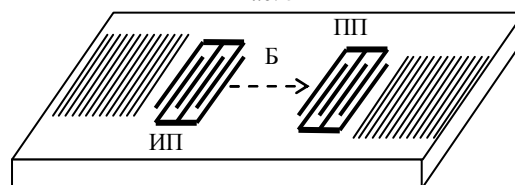


Рис. 6

Работа выполнена в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A surface-acoustic-wave gyro sensor / Minoru Kurosawa, Yoshimitsu Fukuda, Masaya Takasaki, Toshiro Higuchi // *Sensors and Actuators*. 1998. № 66. P. 33–39.
2. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect / S. W. Lee, J. W. Rhim, S. W. Park, S. S. Yang // *J. of micromechanics and Microengineering*. 2007. № 17. P. 2272–2279.
3. Varadan V. K., Varadan V. V. Design and development of a MEMS-IDT gyroscope // *Smart Mater. Struct.* 2000. № 9. P. 898–905.
4. Pat. US № 6516665. Microelectromechanical gyroscope / V. K. Varadan, P. A. Xavier, W. D. Suh, J. A. Kollakompil, V. Varadan. 2003.
5. Lao Binneg Y. Gyroscopic effect in surface acoustic waves // *Ultrasonic Symposium*. New York, NY, USA. 5–7 Nov. 1980. P. 687–691.
6. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. О возможности создания датчиков угловой скорости на базе акустических волн // *Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова*. 2010. Вып. 52 (336). С. 193–202.
7. Исследование возможностей построения чувствительных элементов твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах с использованием анизотропии пьезосвойств кристаллов / Д. П. Лукьянов, М. М. Шевелько, А. Н. Перегудов, Е. С. Грибкова // *Гироскопия и навигация*. 2010. № 3 (70). С. 37–49.
8. Пат. РФ № 2426131. Способ и устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько, С. Ю. Шевченко; заявл. 15.02.2010, опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.
9. Пат. РФ № 2426132. Способ и устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько, С. Ю. Шевченко; заявл. 15.02.2010, опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22.

E. S. Gribkova

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ABOUT THE POSSIBILITY TO USE THE CHARACTERISTICS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES IN MOTION SENSORS

The task of surface acoustic wave (SAW) propagation into rotating anisotropic solid-state media is considered. The SAW characteristics to be used as informative parameters for angular velocity determination are found. New constructions of gyro sensitive elements based on SAW are proposed.

Surface acoustic wave, anisotropic solid-state media, non-inertial system, motion sensor

УДК 531.768

Д. П. Лукьянов, С. Ю. Шевченко, А. С. Кукаев, Р. К. Теличкин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

О возможности построения пассивного беспроводного микрогироскопа

Анализируются существующие принципы построения пассивных беспроводных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах (ПАВ), приводится их конструктивная критика. Описывается новая концепция построения микрогироскопа на ПАВ с фазовым методом измерения, приводятся результаты ее предварительных исследований.

Микрогироскоп, поверхностные акустические волны, пассивный сенсор, беспроводные датчики

Беспроводные измерительные системы с использованием датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ) открывают новые перспективы для дистанционного мониторинга и контроля за различными параметрами [1]–[3]. Преимуществами таких датчиков являются:

- надежность;
- отсутствие механических соединений (контактов);
- возможность работы при больших нагрузках и температурах;
- высокая вибро- и ударопрочность;
- нечувствительность к влажности.

Беспроводные системы можно разделить на несколько типов. Активные устройства используют энергию от аккумулятора. Полуактивные датчики питаются напряжением, получаемым при помощи индуктивной связи или сильного высокочастотного сигнала. Существуют также полностью пассивные устройства, в которых энергии

сигнала запроса достаточно для отправки ответного сигнала и получения информации. Передача сигналов осуществляется по беспроводному высокочастотному (ВЧ) каналу. Именно пассивные устройства раскрывают весь потенциал беспроводных датчиков на ПАВ. В активных системах необходимо иметь доступ к аккумулятору и периодически осуществлять его подзарядку. Полуактивные должны иметь малое расстояние до источника магнитной индукции, чтобы преобразовывать энергию. В отличие от перечисленных датчики на ПАВ позволяют использовать пассивные системы построения.

В общем случае сигнал опроса по каналу радиосвязи передается с блока опроса на приемопередающее устройство на ПАВ. Ответ через этот же канал связи передается назад в блок опроса, но уже неся в себе информацию с датчика [4]. На рис. 1 показано схематичное расположение элементов в устройстве.