

Д.П.ЛУКЬЯНОВ, Ю.В.ФИЛАТОВ, С.Ю.ШЕВЧЕНКО, М.М.ШЕВЕЛЬКО, А.Н.ПЕРЕГУДОВ,
А.С.КУКАЕВ, Д.В.САФРОНОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИКРОГИРОСКОПОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Приводится сопоставительный обзор существующих концепций построения твердотельных микрогирометров (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие датчики обладают высокой вибро- и ударопрочностью, что выгодно отличает их от существующих образцов микромеханических гироскопов. Дано краткое введение в теорию распространения ПАВ в инерциальных системах координат. Проведено сравнение технических характеристик современных ТМГ на ПАВ, обозначены актуальные проблемы и направления развития.

Введение

Современные микромеханические гироскопы (ММГ) нашли широкое применение в автомобилестроении, навигационных системах военного и гражданского применения, нефтяной и газовой промышленности, спорте, медицине и др. Однако существует целый ряд различных военных применений, связанных с высокодинамичными подвижными объектами. Эти области пока недоступны для ММГ, поскольку требуют высокой ударопрочности (до 65000 g), широкого динамического диапазона и малого размера. Существующие ММГ без использования амортизирующего корпусирования не обладают достаточными показателями вибро- и ударопрочности из-за наличия в их конструкции подвижных инерционных масс и упругих подвесов. Поэтому в последние годы существенно возрос интерес к твердотельным микрогирометрам (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). По сравнению с традиционными ММГ гироскопы на ПАВ обладают рядом существенных преимуществ, таких как высокая стой-

Лукьянов Дмитрий Павлович. Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Шевченко Сергей Юрьевич. Кандидат технических наук, ассистент кафедры. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Шевелько Михаил Михайлович. Кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Перегудов Александр Николаевич. Кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Кукаев Александр Сергеевич. Студент 2 курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Сафронов Даниил Валерьевич. Студент 2 курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

кость к вибрациям и ударам, низкая стоимость и простота производства. Для их изготовления применяются 2D технологии, подобно обычным ПАВ-фильтрам.

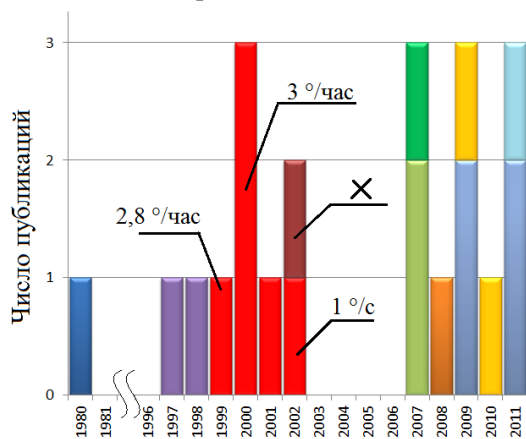


Рис. 1. Распределение числа публикаций о ТМГ на ПАВ по годам

Историю развития концепций построения ТМГ на ПАВ можно проследить, анализируя число публикаций по этой тематике, распределенное по годам (рис. 1). Многие работы были написаны в конце 90-х годов. Автором большинства из них являлся В.К. Варадан с соавторами [1–6]. Они предприняли попытку реализации концепции, предложенной М. Куросавой в 1997 году [7, 8]. Однако от работы к работе публикуемые значения потенциальной точности прибора убывали, пока в 2002 году не вышла статья Р.К. Вудса с соавторами [9], в кото-

рой было показано, что величина регистрируемого сигнала на уровне 10^{-4} В недостижима на данном этапе.

Тем не менее в 2007 году появились новые идеи построения ТМГ на ПАВ. Их авторы предлагали использовать линии задержки (ЛЗ) для получения информации о величине действующей угловой скорости. В. Ван и К. Ли со своими научными группами разработали различные концепции, в которых ЛЗ применялись либо непосредственно, либо в сочетании с резонатором ПАВ [10 – 17].

Существующие принципы построения таких датчиков базируются на теории распространения ПАВ в инерциальном пространстве. Ее основы были заложены в 1980 году Б. И. Лао [18].

Теория распространения ПАВ в инерциальном пространстве

Рассмотрим плоскую рэлеевскую волну длиной λ , распространяющуюся вдоль линейной упругой среды в полупространстве ($x_3 \leq 0$), как показано на рис. 2.

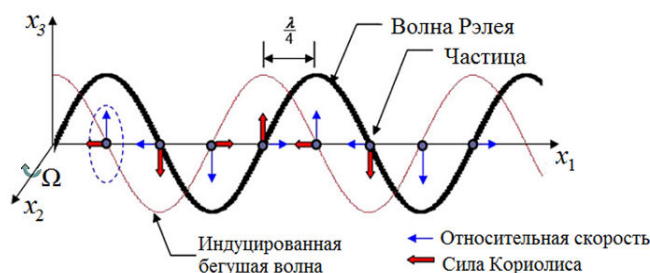


Рис. 2. Гироскопический эффект в рэлеевских ПАВ

Волна распространяется вдоль координаты x_1 и не зависит от координаты x_2 . Для объяснения гироскопического эффекта на ПАВ проанализируем движение частиц вблизи поверхности звукопровода ($x_3 \sim 0$), где амплитуда их движения велика по сравне-

нию с частицами, расположенными на глубине. Если подложка вращается вокруг оси x_2 с постоянной угловой скоростью Ω , то на движущиеся частицы действуют кориолисово и центростремительное ускорения, а также соответствующие им силы. Поскольку движение частиц в поле рэлеевской волны имеет

эллиптический характер (как показано на рис. 2), то частицы в экстремальных и нулевых точках траектории ПАВ колеблются соответственно перпендикулярно и касательно к поверхности. При вращении звукопровода вокруг оси x_2 действие силы Кориолиса на вибрирующие частицы возбуждает новую бегущую волну, смещенную на $\lambda/4$. Это приводит к изменению фазовой скорости ПАВ и, следовательно, к изменению ее частоты пропорционально приложенной угловой скорости. Отметим, что действие сил Кориолиса на частицы, расположенные в глубине подложки, можно не учитывать ввиду их незначительности.

Для нахождения коэффициента преобразования, определяющего соотношение между приращением фазовой скорости волны и действующей угловой скоростью, приведем, следуя работам [11, 17 – 19], уравнение движения ПАВ во вращающейся системе координат для случая изотропной подложки:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} + 2\rho \epsilon_{ijk} \Omega_j \frac{\partial u_k}{\partial t} + \rho(\Omega_i \Omega_j u_j - \Omega_j^2 u_i) = 0, \\ T_{i3} = C_{i3kl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $i, j, k, l = 1, 2, 3$; $x_3 = 0$; ρ – плотность материала звукопровода; $u_{i,j,k,l}$ – компоненты вектора упругих смещений; C_{ijkl} – тензор упругих постоянных; ϵ_{ijk} – символ Леви – Чевита; $\Omega_{i,j}$ – компоненты вектора постоянной угловой скорости; T_{i3} – механическое напряжение.

Первые два члена в уравнении (1) описывают инерционные и упругие свойства звукопровода соответственно. Третий член описывает силы Кориолиса, а четвертый – центробежные силы.

Решение уравнения (1) можно записать в виде

$$H(V) = H_0(V) + \delta h(V),$$

где

$$H_0(V) = \left(2 - \frac{V^2}{v_T^2}\right)^2 - 4 \left(1 - \frac{V^2}{v_L^2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{V^2}{v_T^2}\right)^{1/2}$$

для ПАВ в отсутствие угловой скорости и

$$h(V) = \frac{2V^2}{v_L^2 - v_T^2} \left[\left(1 - \frac{V^2}{v_L^2}\right)^{1/2} \left(\frac{v_L^2 V^2}{v_T^4} - 4\right) - \left(1 - \frac{V^2}{v_T^2}\right)^{1/2} \left(\frac{V^2}{v_T^2} - 4\right) \right]$$

для ПАВ при наличии угловой скорости; $v_L = \sqrt{C_{11}/\rho}$, $v_T = \sqrt{C_{44}/\rho}$ – фазовые скорости продольной и поперечной составляющих волны соответственно.

Теперь может быть записано выражение для приращения фазовой скорости ПАВ

$$\Delta V = -h(V_0) \left(\frac{\partial H_0(V)}{\partial V} \Big|_{V=V_0} \right)^{-1} \cdot \frac{\Omega}{\omega}, \quad (2)$$

где V_0 – фазовая скорость ПАВ при $\Omega = 0$, ω – круговая частота ПАВ.

От соотношения (2) удобно перейти к относительным величинам

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \frac{\Omega}{\omega},$$

где β – коэффициент преобразования, связывающий относительное приращение скорости ПАВ со значением угловой скорости, приведенным к собственной круговой частоте ПАВ. Его значение может быть получено из уравнения (2) подстановкой продольной и поперечной составляющих скорости волны

$$\beta = \frac{\xi^2}{2(1-\xi^2)} \frac{(1-\eta^2\xi^2)^{1/2} (n^2\xi^2-4) - (1-\eta^2)(\eta^2-4)}{(\eta^2-2) + (1+\xi^2-2\xi^2\eta^2)(1-\xi^2n^2)^{1/2}(1-\eta^2)^{1/2}},$$

где $\xi = v_T/v_L$ и $\eta = V_0/v_T$. Поскольку для изотропного тела максимальное значение $\xi = 0,5$, а η лежит в пределах $0,87 < \eta < 0,96$ [21], можно утверждать, что максимальное значение коэффициента $\beta \approx 0,48$.

В современных технологиях построения ТМГ можно выделить два направления, ориентированные на использование стоячих и бегущих волн. Начнем обзор с последних.

ТМГ на бегущих ПАВ

ТМГ на ПАВ с цилиндрическим звукопроводом

Одну из первых концепций построения ТМГ на ПАВ предложил Б.И. Лао в 1980 г. [18] (рис. 3).

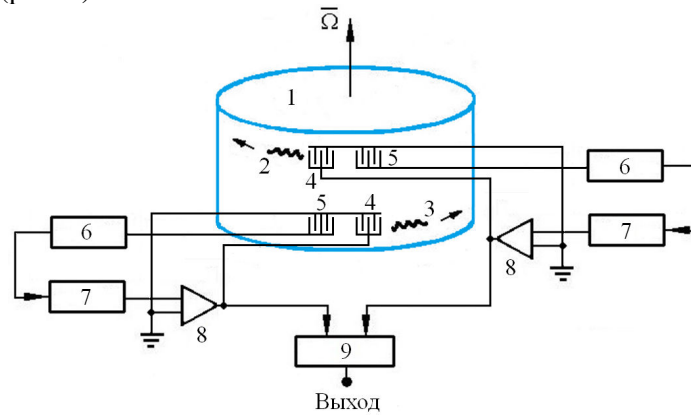


Рис. 3. ТМГ на ПАВ с кольцевым резонатором: 1 – цилиндр с пьезоэлектрическим покрытием; 2, 3 – встречно бегущие ПАВ; 4, 5 – однонаправленные ВШП; 6 – фазовращатели; 7 – фильтры; 8 – усилители; 9 – смеситель

В качестве звукопровода здесь использовался цилиндр 1 из плавленого кварца с пьезоэлектрическим покрытием. При помощи генераторов, образованных однонаправленными встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) 4, 5, усилителями 8 и фазовращателями 6, создается пара встречно бегущих ПАВ 2, 3 с одинаковой длиной волны λ (при $\Omega = 0$), такой, что $N\lambda = 2\pi r$, где r – радиус цилиндра. При этом частоты волн будут равны $\omega_0 = \frac{NV_0}{r}$.

Однонаправленные ВШП были разнесены в вертикальной плоскости для исключения эффекта захвата встречно бегущих волн. При $\Omega \neq 0$ частоты возбуждаемых ПАВ $\omega_{\pm}$ могут быть записаны в виде

$$\omega_{\pm} = \frac{N(V_0 + \Delta V_{\mp})}{r},$$

где $\Delta V_{\mp}$ – приращение фазовой скорости каждой из ПАВ при наличии вращения. Проинтегрированный выходной сигнал φ смесителя 9 в таком случае будет равен

$$\varphi = \int (\omega_{+} - \omega_{-}) dt = 2 \left(\frac{\Delta V/V_0}{\Omega/\omega} \right) \Omega t = 2\beta\theta,$$

где V_0 – скорость ПАВ, θ – суммарный угол поворота гироскопа.

Исследования [18] показали, что для обнаружения угловой скорости 1,5 град/ч, что соответствует 1/10 скорости суточного вращения Земли, необходимо значение кратковременной стабильности генераторов порядка $3 \cdot 10^{-13}$. Такой уровень реализуется в квантовых генераторах и недостижим для ПАВ. Поэтому результатов экспериментальных исследований автор в работе не приводит. Однако спустя почти 30 лет, в 2007 году, К. Ли с соавторами предложил концепцию построения ПАВ-гироскопа с двумя линиями задержки [11], которая отчасти повторяет описанный вариант.

ТМГ на ПАВ с двумя линиями задержки

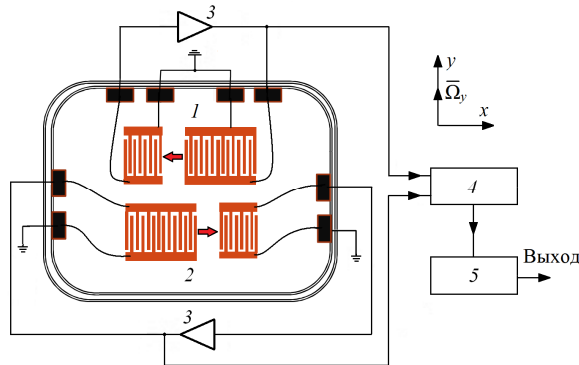


Рис. 4. Структурная схема ТМГ на двух линиях задержки
ПАВ: 1, 2 – ЛЗ; 3 – усилители; 4 – смеситель;
5 – полосовой фильтр

вращается вокруг оси y ($\Omega_y \neq 0$), то фазовые скорости ПАВ в линиях задержки приобретают противоположные по знаку приращения, как было показано ранее. Это, в свою очередь, вызывает смещение собственных частот автогенераторов на величину

$$f_1 = f_{10} - \Delta f, f_2 = f_{20} + \Delta f.$$

Колебания с частотами, получившими дифференциальное приращение, поступают на смеситель 4, где формируются два гармонических колебания на суммарной и разностной частотах. Установленный на выходе смесителя полосовой фильтр 5 выделяет сигнал разностной частоты, величина которой пропорциональна угловой скорости. Таким образом, реализуется дифференциальная схема частотного типа на встречно бегущих ПАВ. При этом направление

На рис. 4 приведена структурная схема микрогироскопа на двух линиях задержки, предложенная в работе [11]. Она состоит из двух независимых генераторов, каждый из которых образован ЛЗ 1 и 2 в цепи положительной обратной связи усилителей 3. При отсутствии угловой скорости генераторы работают на собственных частотах f_{10} и f_{20} , возбуждая пару встречно бегущих ПАВ. Если основание

вращения может быть определено по знаку приращения частоты в одном из генераторов.

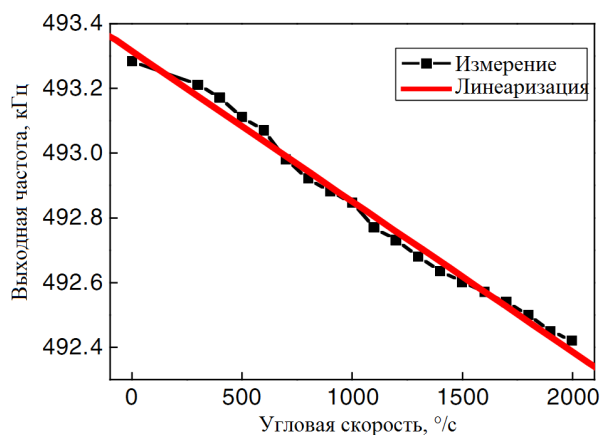


Рис. 5. Выходная характеристика ТМГ на ПАВ с двумя линиями задержки

по оси x оказался равным $0,16 \text{ Гц}/\dots\text{град}/\text{с}$, что составляет 35% от чувствительности по измерительной оси y и является дополнительным источником погрешности. Такое значение можно объяснить наличием горизонтально-поляризованной составляющей волны которая, по утверждению авторов, может быть значительно уменьшена при грамотном выборе материала и кристаллического среза. Чувствительность по оси z оказалась на уровне шумов, и авторы статьи ее не учитывают.

В результате экспериментальных исследований лабораторного макета ТМГ, авторами были получены технические характеристики, которые приведены в табл. 1 [11].

Т а б л и ц а 1

Параметры	Значение
Собственные частоты генераторов, МГц	$f_{10} = 98,0315$ $f_{20} = 98,5247$
Первоначальный разнос частот Δf_0 , кГц	493,3
Скорость ПАВ для кварца ST-среза, м/с	3158
Собственные потери в ЛЗ, дБ	15,2
Коэффициент температурной чувствительности, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	0,4
Коэффициент электромеханической связи, %	0,11
Коэффициент преобразования β	-0,85
Масштабный коэффициент, $\text{Гц}/\dots^\circ/\text{с}$	0,431
Время выхода на рабочий режим, с	100
Диапазон измерений, $^\circ/\text{с}$	2000
Габариты ТМГ, мм	9×9

Обращает на себя внимание значительная величина начального разноса частот (493,3 кГц), которая вызвана технологическими ограничениями, возникающими при изготовлении однотипных ЛЗ [22, 23]. Это неизбежно приводит к увеличению времени выхода датчика на рабочий режим, которое определяется температурной зависимостью частоты выходного сигнала. Вместе с тем потенциально возможное применение датчиков в высокودинамичных подвижных объектах не подразумевает какого-либо времени на прогрев датчиков. Поэтому

достигнутое авторами время готовности на уровне 100 с является существенным недостатком предлагаемого ТМГ.

Одним из основных достоинств данной концепции построения является ее чрезвычайная простота, которая вызвана минимальным набором используемых элементов. Линии задержки уже сейчас массово производятся при помощи фотолитографии. Применяемые электронные компоненты являются типовыми и миниатюрными. Эти факты позволяют говорить о потенциально низкой стоимости и малых габаритах такого датчика, что делает его привлекательным для дальнейшей разработки.

Полезно напомнить, что в этом разделе представлен ТМГ на ПАВ с вертикальной поляризацией. Дальнейшие исследования [14] показали, что можно добиться лучших показателей точности, применяя волны горизонтальной поляризации.

ТМГ на горизонтально-поляризованных ПАВ

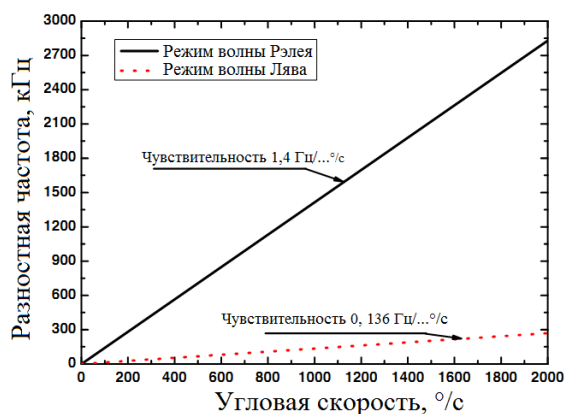


Рис. 6. Сравнение теоретических показателей чувствительности для ТМГ на волнах Лява и Рэлея

Лява в кварце ST-среза.

В. Ван с соавторами в работе [14] привел теоретический анализ (рис. 6), который показал, что ПАВ-гироскоп, работающий на волнах горизонтальной поляризации (волнах Лява), должен обладать в 10 раз большей чувствительностью, чем микрогироскоп на волнах вертикальной поляризации (рэлеевских).

Причиной называлась разница в скоростях распространения – 3158 м/с для волны Рэлея и 4920 м/с для волны

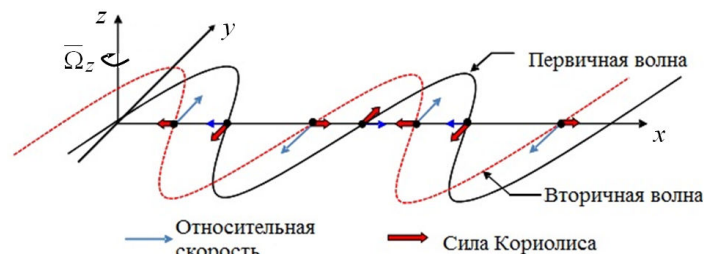


Рис. 7. Гироскопический эффект на ПАВ горизонтальной поляризации

Природа гироскопического эффекта в горизонтально-поляризованных волнах такая же, как и в волнах Рэлея (рис. 7). В качестве звукопровода авторы использовали кварц ST-90° X-среза (с углами Эйлера [0; 132,75; 90°]). Для генерации волны использовались ВШП повышенной массы. Такое устройство линий задержки должно было обеспечить высокие значения температурной стабильности и коэффициента электромеханической связи.

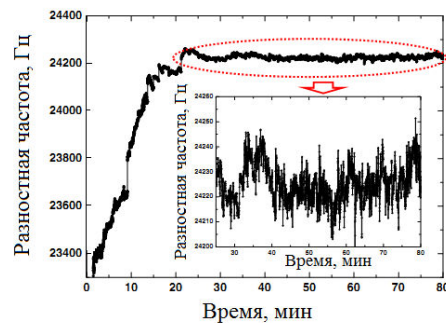
Структурная схема предложенного ТМГ оставалась такой же, как и на рис. 4. Эксперименты, проведенные с макетом описанного датчика, позволили определить ряд характеристик (табл. 2). Следует отметить, что эксперименты проводились при температуре 25 °С.

Т а б л и ц а 2

Параметры	Значение
Рабочая частота линий задержки, МГц	80
Скорость ПАВ для кварца ST-среза, м/с	4920
Собственные потери в ЛЗ, дБ	9,5
Масштабный коэффициент, Гц/...°/с	1,268
Время выхода на рабочий режим, с	1200
Диапазон измерений, °/с	37 – 2000
Температурная нестабильность, %	2,2
Кратковременная стабильность (80 мин), $\times 10^{-6}$	~ 0,2
Долговременная стабильность (24 ч), $\times 10^{-6}$	~ 0,8
Габариты ЛЗ, мм	8×14

Как видно, полученное значение чувствительности в три раза превышает значения, полученные при использовании волн Рэлея (см. табл. 1). Графики кратковременной и долговременной стабильностей приведены на рис. 8.

а)



б)

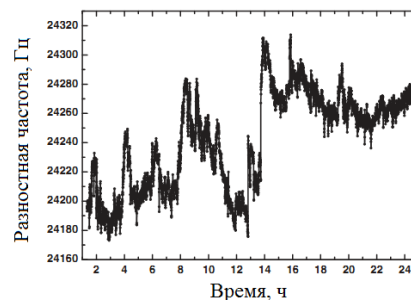


Рис. 8. Результаты исследования стабильности выходного сигнала датчика:

а) кратковременной (1 ч); б) долговременной (24 ч)

По словам авторов, основным источником нестабильности сигнала является нагрев элементов электрической схемы. В результате за первые 15 мин после подачи питания разностная частота возросла на 800 Гц. Полное же время готовности составило порядка 20 мин, что в 12 раз больше, чем для макета на волнах Рэлея. Этот факт показывает, что проблема времени готовности является сегодня одной из актуальных для ТМГ на ПАВ. Однако, несмотря на проблемы с

временем выхода на рабочий режим, следует отметить, что описанный образец имеет хорошие показатели чувствительности и линейности, что делает его привлекательным для дальнейших исследований.

Другим перспективным направлением является применение стоячих ПАВ, используя которые можно получить большие значения сил Кориолиса.

ТМГ на стоячих ПАВ

В 1997 году М. Куросава с соавторами предложил одну из первых концепций построения ТМГ на стоячих ПАВ [7]. Частицы в ее пучностях совершают колебательные движения в направлении, перпендикулярном плоскости звукопровода, а в узлах – вдоль нее (рис. 9, а). Наличие колебаний позволяет возбудить силу Кориолиса при вращении и, следовательно, определить значение угловой скорости (рис. 9, б).

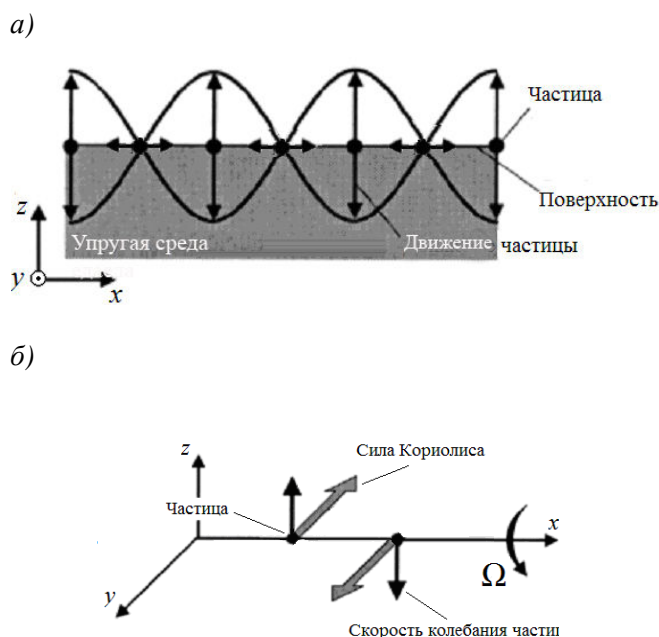


Рис. 9. Движение частиц в поле стоячей рэлеевской волны:
а) в отсутствии вращения; б) при вращении

В отличие от концепций, описанных в предыдущих разделах, здесь информативным параметром является не частота, а амплитуда вторичной ПАВ. Она определяется силой Кориолиса, которая, в свою очередь, пропорциональна массе движущихся частиц звукопровода. Следовательно, амплитуда возникающей вторичной волны должна быть слишком мала для детектирования. Поэтому авторы предлагают разместить в площади ПАВ-резонатора матрицу миниатюрных навесных масс (66×61 мкм, $1,5 \cdot 10^{-11}$ г). Структурная схема такого сенсора представлена на рис. 10.

Здесь с помощью возбуждающих ВШП 1 и отражателей 2 генерируется первичная стоячая волна 3, в пучностях которой навешиваются миниатюрные массы, образующие матрицу 4. Вместе с частицами звукопровода они совершают колебания вдоль оси z . При наличии угловой скорости (см. рис. 10) возникают ускорение Кориолиса и соответствующие ему силы, ортогональные на-

правлению первичной волны 3. Под их действием частицы звукопровода вместе с навесными массами совершают колебательные движения вдоль направления y , возбуждая вторичную ПАВ 5, которая фиксируется ВПП 6.

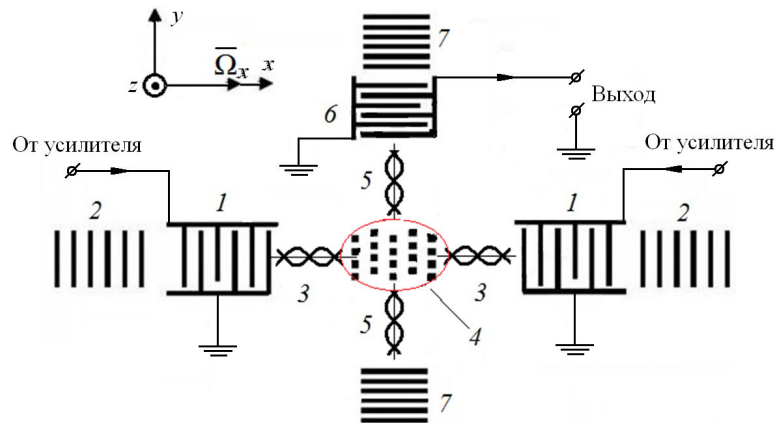


Рис. 10. ТМГ на ПАВ с распределенными навесными массами: 1 – возбуждающие ВПП; 2 – отражатели возбуждающего резонатора; 3 – первичная стоячая волна; 4 – матрица навесных масс; 5 – вторичные стоячие волны; 6 – приемный ВПП; 7 – отражатели вторичного (приемного) резонатора

В работе [6] описаны результаты испытаний ТМГ, изготовленного по приведенной схеме. При использовании подложки из 128° YX-срезы LiNbO_3 авторами на частоте ПАВ 74,2 МГц был получен очень слабый выходной сигнал на уровне сотых долей микровольта. В связи с этим описанная концепция была подвергнута серьезной критике [9]. Отметим, что это обстоятельство не прекращало попыток использования подобного принципа построения ТМГ, о чем свидетельствуют работы [12, 24], опубликованные в 2008 и 2009 гг. Рассмотрим первую из них более подробно.

ТМГ на ПАВ с двойным преобразованием

Наилучшего результата в построении ТМГ на стоячих ПАВ с навесными элементами удалось достичь В. Вану с соавторами в работе [12]. На рис. 11 показана структурная схема предложенного ТМГ.

Здесь, как и ранее в работе [7], в резонаторе 1 возбуждается стоячая волна, в пучностях которой размещается матрица навесных элементов 2. При наличии вращения возбуждается вторичная волна 3, амплитуда которой пропорциональна значению угловой скорости. Таким образом, осуществляется первичное преобразование измеряемой угловой скорости в информативный параметр – амплитуду вторичной ПАВ. Далее вторичная волна проходит через преобразующую линию задержки 4, которая вместе с усилителем 5 формирует автогенератор на частоте, близкой к частоте резонатора 1. В области пересечения вторичной волны 3 с волной 6, бегущей в линии задержки 4, происходит их интерференция, что инициирует изменение фазовой скорости бегущей волны 6 и, как следствие, вызывает сдвиг частоты соответствующего автогенератора. Следовательно, вторичным преобразованием является трансформация амплитуды индуцированной волны 3 в вариации частоты автономного осциллятора. Сигнал с

его выхода поступает на смеситель 7, где перемножается с выходным сигналом автогенератора, образованного реперной ЛЗ 8 и усилителем 9. Таким образом, разность частот двух автогенераторов Δf пропорциональна действующей угловой скорости.

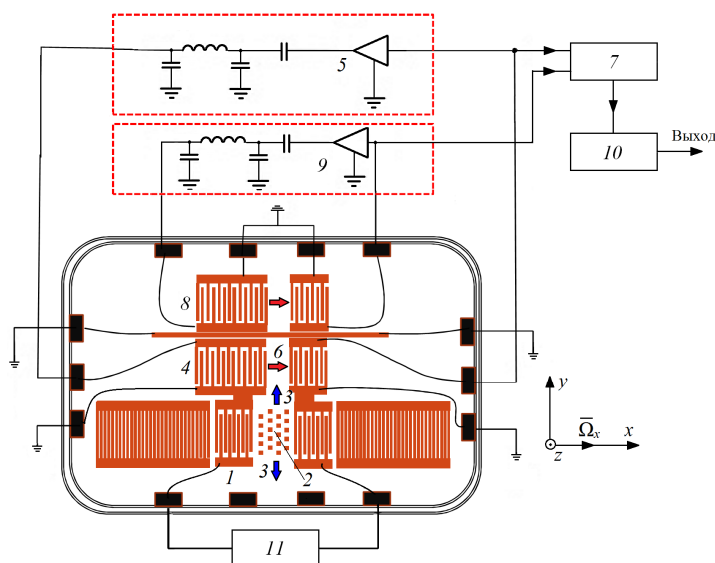


Рис. 11. Устройство ТМГ с двойным преобразованием

Экспериментальный образец описанного ТМГ был изготовлен на подложке из ниобата лития (LiNbO_3) 128° YX-среза. Управляемый напряжением генератор K.S.E. KSV-5M075A подключался к резонатору для настройки его на частоту 80 МГц. ВШП резонатора состояли из 5 электродов и имели апертуру $40 \lambda_x$. Каждый отражатель состоял из 451 электрода, а длина резонатора составила $50 \lambda_x$. В линиях задержки использовались однонаправленные ВШП с апертурой $50 \lambda_x$. Навесные массы размером 12×11 мкм были размещены в шахматном порядке, образуя матрицу 45×49 элементов. Расстояния между столбцами и строками были $\lambda_x/4$ и $\lambda_y/4$ соответственно. Общий размер датчика составил $1,2 \times 0,75$ см. Его характеристики, определенные при экспериментальных исследованиях, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметры	Значение
Рабочая частота линий задержки и резонатора, МГц	80
Длина волны λ_x , мкм	48,646
Скорость ПАВ для LiNbO_3 , м/с	3961
Масштабный коэффициент, Гц/...°/с	119
Коэффициент электромеханической связи, %	5,56
Нелинейность характеристики, %	7,6
Диапазон измеряемых угловых скоростей, ...°/с	0 – 1000
Габариты навесных элементов, мкм	12×11
Габариты ТМГ, мм	$12 \times 7,5$

Следует отметить, что эксперименты проводились в вакуумной камере при постоянных температуре и влажности. Поэтому можно предположить, что по-

лученные характеристики окажутся значительно хуже при использовании ТМГ в нормальных условиях. Несмотря на это, описанная концепция представляет существенный интерес, поскольку обладает наибольшим на сегодняшний день значением масштабного коэффициента.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что в последнее время существенно возрос интерес к построению ТМГ на ПАВ. Основной причиной этого являются его высокие показатели вибро- и ударопрочности, низкая стоимость и хорошо отработанные 2D-технологии производства, которые делают данный сенсор привлекательным объектом для разработки. Несмотря на то, что в рассмотренных работах авторы не приводят потенциальных значений точности ТМГ, полученные результаты показывают, что их чувствительность растет из года в год и уже вплотную приблизилась к показателям традиционных вибрационных ММГ. Это позволяет сделать предположение о начале коммерческого производства ТМГ на ПАВ в ближайшем будущем. Однако можно выделить и ряд существенных недостатков, которые требуют дальнейших усилий разработчиков. Следует отметить, что авторы не приводят в своих работах данных о методах определения направления угловой скорости. Из этого можно сделать вывод, что такая задача не является тривиальной для ТМГ на ПАВ. Особое внимание должно быть уделено сокращению времени готовности датчиков как одной из основных задач для дальнейшего улучшения их точностных характеристик. В опубликованных на сегодняшний день результатах лучшее значение оказалось на уровне 100 с, что неприемлемо для использования в высокодинамичных объектах военного применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Varadan V. K., Varadan V. V., Suh W. D. et al.** Design and development of a MEMS-IDT gyroscope // *Smart Mater. Struct.* № 9, 2000, P. 898-905.
2. **Varadan V. K., Xavier P., Varadan V. V., Suh W. D.** Conformal MEMS-IDT gyroscopes and their comparison with fiber optic gyro // *Proc. SPIE Vol. 8990* (2000), p.335-344.
3. **Varadan V. K., Suh W. D., Jose K. A., Varadan V. V.** Hybrid MEMS-IDT-based accelerometer and gyroscope in a single chip // *Proc. SPIE 4334*, 119 (2001).
4. **W. D. Suh, K. A. Jose, P. B. Xavier, V. K. Varadan, V. V. Varadan** Design, simulation, and testing of IDT-based MEMS gyroscope // *Proc. SPIE 4334*, 95 (2001).
5. **Jose K. A., Suh W. D., Xavier P. B., Varadan V. K., Varadan V. V.** Surface acoustic wave MEMS gyroscope. 2002. *Wave Motion*. vol.36, iss.4. 367 - 381.
6. **Mehta A., Jose K. A., Varadan V. K.** / Numerical simulation of a surface acoustic wave (SAW) gyroscope using HP Eesof // *Proc. SPIE 4700*, 169 (2002).
7. **Kurosawa M., Fukuda Y., Takasaki M. Highuchi T.** / A surface acoustic wave gyro // *Transducers* (1997), pp. 863-866.
8. **Kurosawa M.** A surface acoustic-wave gyro sensor // *Sensors and Actuators*, 1998. P. 33-39.
9. **Woods R.C., Kalami H., Johnson B.** . Evaluation of a Novel Surface Acoustic Wave Gyroscope // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* vol.49, №1. 2002.
10. **A Novel Micro Rate Sensor using a Surface-Acoustic-Wave (SAW) Delay-line Oscillator.** S. W. Lee, J. W. Rhim, S. W. Park, S. S. Yang // *Sensors*, 2007 IEEE P. 1156 - 1159.
11. **A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect.** S. W. Lee, J. W. Rhim, S. W. Park, S. S. Yang // *J. Micromech. Microeng.* 2007. № 17. P 2272-2279.
12. **Enhanced Sensitivity of Novel Surface Acoustic Wave Microelectromechanical System-Interdigital Transducer Gyroscope.** W. Wang, H. Oh, K. Lee, S. Yoon, S. Yang // *JJAP*. 2009. №48.
13. **Theoretical sensitivity evaluation of a shear-horizontal SAW based micro rate sensor.** W. Wang; S. He; H. Li // *Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2009 P. 1684 - 1687.

14. **A New Micro-rate** Sensor Based on Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Gyroscopic Effect. W. Wang, F. Xu, S. He, S. Li, K. Lee // JAP. 2010. №49.
15. **Oh H., Wang W., Yang S., Lee K.** Development of SAW based gyroscope with high shock and thermal stability // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 165, Issue 1, January 2011, Pages 8-15
16. **Oh H., Wang W., Yang S., Lee K.** Enhanced sensitivity of a surface acoustic wave gyroscope using a progressive wave // J. Micromech. Microeng., 2011
17. **YANG Zengtao et al.**, A Novel Receiving Electrodes for SAW Gyro // Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, №3
18. **Lao B. Y.** . Gyroscopic effect in surface acoustic waves // Proc IEEE Ultrasonics Symp. 1980. P. 687-691.
19. **Sarapuloff S.A., Skripkovskii G. A., Rhim J. W.**. Inertial effects in surface and bulk elastic waves and possibility of their use in high-G solid-state micro gyros // 12th International Conference on Integrated Navigation Systems. - СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2005. pp.355 - 361.
20. **Collet B.** Gyroscopic effect in surface acoustic waves in anisotropic solid media // WCU (Paris), 2003. pp. 991-994.
21. **Farwell G. W.** Topics in 30
22. Applied Physics. Ed. By Oliver A. A. Springer - Verlag, N.Y., 1978. V. 24. pp. 13 - 60.
23. **Разработка** и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах (Часть 2) // Д. П. Лукьянов [и др.] // Гироскопия и навигация. - СПб: 2008. - № 3 (58). - С. 62-76.
24. **The development** and investigation of the SAW-microaccelerometer / D.P. Lukianov and other // Proceedings 11th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. - СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2004. - С. 300 - 306.
25. **Математическое** моделирование гироскопа на ПАВ /Калинин, Ю. [и др.] // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2008. Спецвыпуск. С. 47-51.

Abstract. A comparative review of the existing design concepts of solid-state microgyros based on acoustic surface waves is presented. Such sensors have high shock and vibration resistance, and they compare favourably with the existing samples of micromechanical gyros. The article gives a brief introduction in the theory of acoustic surface wave propagation in inertial coordinate systems. Specifications of the modern solid-state microgyros based on acoustic surface waves are compared, and actual problems and trends of their development are emphasized in the article.