

В. П. Сизов¹, д-р техн. наук, проф., valpalsiz@yandex.ru,
В. А. Погорелов^{1,2}, д-р техн. наук, доц., vadim.pogorelov.rnd@gmail.com,
Ю. В. Вахтин¹, нач. отдела, wyw_rost@mail.ru,

¹ФГУП "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи", Ростов-на-Дону

²Российский университет дружбы народов, г. Москва

Двухосевой твердотельный микрогироскоп на поверхностных акустических волнах*

Статья посвящена разработке двухосевого твердотельного микрогироскопа (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Предлагаемый гироскоп относится к классу недорогих чувствительных элементов, обладающих высокой устойчивостью к действию перегрузок на длительном интервале времени. Данное преимущество делает приоритетным использование ТМГ на ПАВ в системах навигации и управления объектами, функционирующими в условиях действия перегрузок, достигающих 65 000 g. На сегодняшний день известен целый ряд принципов построения ТМГ на ПАВ: ТМГ на стоячих ПАВ и ТМГ на бегущих ПАВ. В статье исследуется первый тип гироскопов. Общим недостатком существующих ТМГ на стоячих ПАВ является возможность их использования для измерения угловой скорости только относительно одной оси. В связи с этим в статье предложена оригинальная схема двухосевого ТМГ на стоячих ПАВ. Ее применение потребовало исследования влияния вращения основания на параметры упругих волн, распространяющихся в конструкции из слоя на подложке и построения моделей падающих и отраженных волн. Приведены результаты численного моделирования, показывающие влияние вращения основания на комплексные коэффициенты отражения объемных волн от слоя на подложке, фазовую скорость и частоту, а также амплитуду колебаний частиц, участвующих в переносе ПАВ, и форму эллиптической траектории движения частиц. Дан сравнительный анализ ТМГ на ПАВ с существующими микромеханическими гироскопами и рассмотрены основные технологические процессы производства ТМГ на ПАВ.

Ключевые слова: твердотельный микрогироскоп на поверхностных акустических волнах, упругие волны

Введение

На сегодняшний день известен ряд принципов построения гироскопов, широко используемых в системах навигации и ориентации подвижных объектов. В ракетно-космической технике наиболее широкое распространение получили поплавковые гироскопы и гироскопы с электростатическим подвесом ротора. Их преимуществом является высокая точность, а недостатком — высокая стоимость и большие массогабаритные параметры [1–3].

Потребность в применении недорогих, но обладающих высокой точностью гироскопов, появилась с созданием высокоточных средств поражения [4–10]. К этой категории, в первую очередь, относятся микромеханические гироскопы (ММГ), которые представляют собой гироскопы вибрационного типа, сконструированные в

виде электронного чипа с кварцевой подложкой площадью в несколько квадратных миллиметров [11]. Принципиальной особенностью этих датчиков является использование при их производстве материалов и технологий современной твердотельной микроэлектроники и высокодобротных неметаллических материалов. ММГ имеют встроенные средства управления и обработки информации, малые массу и габаритные размеры, низкое энергопотребление.

Однако существуют области, в которых применение ММГ практически невозможно, поскольку они не обладают достаточной ударопрочностью, например, их нельзя применять в артиллерийских снарядах [4, 5]. В связи с этим в последние годы наблюдается рост интереса к твердотельным микрогироскопам (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), отличающимся стойкостью к вибрациям и ударам и простотой производства, основанного на хорошо отработанной 2D-технологии, а также низкой стоимостью.

*Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН "5-100".

В современных технологиях построения ТМГ на ПАВ можно выделить два основных направления: ТМГ на стоячих ПАВ и ТМГ на бегущих ПАВ. Известен целый ряд конструкций таких гироскопов: ТМГ на ПАВ с цилиндрическим звуководом, с линиями задержки, с двойным преобразованием и ТМГ на горизонтально-поляризованных ПАВ [12–15].

Наибольшее распространение получили ТМГ на стоячих ПАВ. Идея их создания принадлежит М. Куросаве и его соавторам [13]. Суть идеи, предложенной ими, состоит в том, что частицы

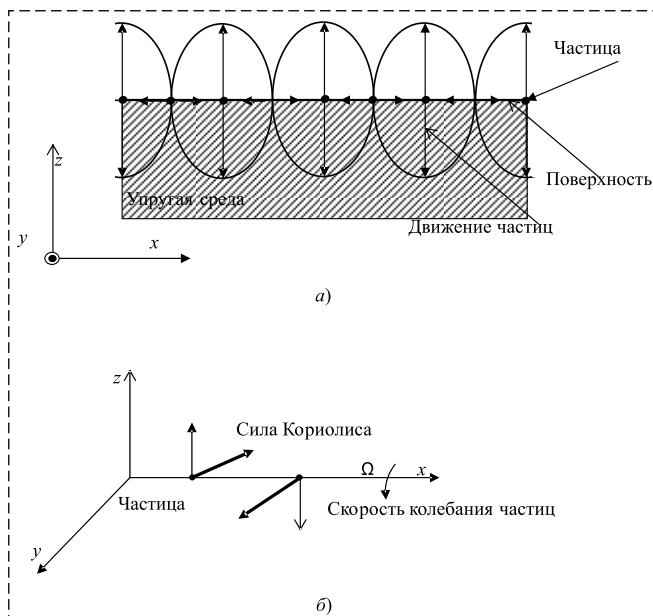


Рис. 1. Движение частиц в поле стоячей рэлеевской волны в отсутствие вращения (а); движение частиц в поле стоячей рэлеевской волны при вращении (б)

Fig. 1. Movement of particles in Rayleigh standing wave field without rotation (a); movement of particles in Rayleigh standing wave field with rotation (b)

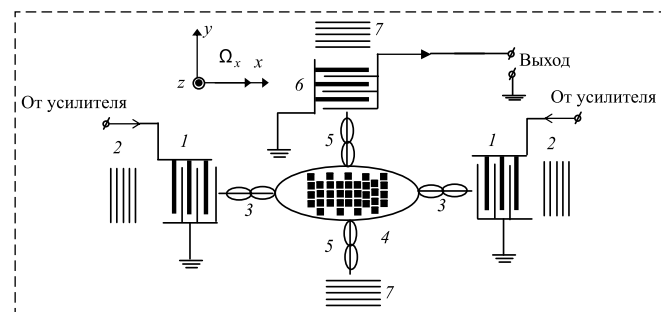


Рис. 2. ТМГ на ПАВ с распределенными навесными массами: 1 — возбуждающие ВШП; 2 — отражатели возбуждающего резонатора; 3 — первичная стоячая волна; 4 — матрица навесных масс; 5 — вторичные стоячие волны; 6 — приемный ВШП; 7 — отражатели вторичного (приемного) резонатора

Fig. 2. SMG on SAW with distributed mounted masses: 1 — exciting IDTs; 2 — reflectors of exciting resonator; 3 — primary standing wave; 4 — mounted masses matrix; 5 — secondary standing waves; 6 — receiver IDT; 7 — secondary (receiver) resonator reflectors

инерциальных масс, расположенные в пучностях стоячей волны, совершают колебательные движения в направлении, перпендикулярном плоскости звукопровода (рис. 1, а). Наличие колебаний позволяет возбудить силу Кориолиса при вращении и, следовательно, определить значение угловой скорости (рис. 1, б).

В предложенном М. Куросавой гироскопе информативным параметром является амплитуда вторичной ПАВ. Она определяется силой Кориолиса, которая, в свою очередь, пропорциональна массе движущихся частиц звукопровода.

Однако амплитуда возникающей вторичной волны слишком мала для детектирования. Поэтому в площади ПАВ-резонатора размещается матрица миниатюрных навесных масс (66×61 мкм, $1,5 \cdot 10^{-11}$ г). Структурная схема такого датчика угла представлена на рис. 2.

Здесь с помощью возбуждающих встречно-штыревых преобразователей (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 возникают ускорение Кориолиса и соответствующие ему силы, ортогональные направлению первичной волны 3. Под их действием частицы звукопровода вместе с навесными массами совершают колебательные движения вдоль направления y , возбуждая вторичную ПАВ 5, которая фиксируется ВШП 6.

Существенным недостатком описанных в работах [12, 13, 15] технических решений является ограничение их функциональных возможностей, обусловленное тем, что данные гироскопы обеспечивают регистрацию угловой скорости вращения несущего основания только относительно одного направления его вращения. Для регистрации угловых скоростей относительно двух направлений вращения несущего основания необходимо дополнительно установить второй аналогичный гироскоп, что приводит к усложнению конструкции и увеличению ее стоимости.

Цель работы — разработка двухосевого ТМГ на ПАВ и получение соотношений для расчета зависимости параметров упругих волн от скорости вращения несущего основания.

Схема и принцип действия двухосевого ТМГ на ПАВ

Устройство двухосевого ТМГ на ПАВ показано на рис. 3 [14]. Гироскоп содержит несущее

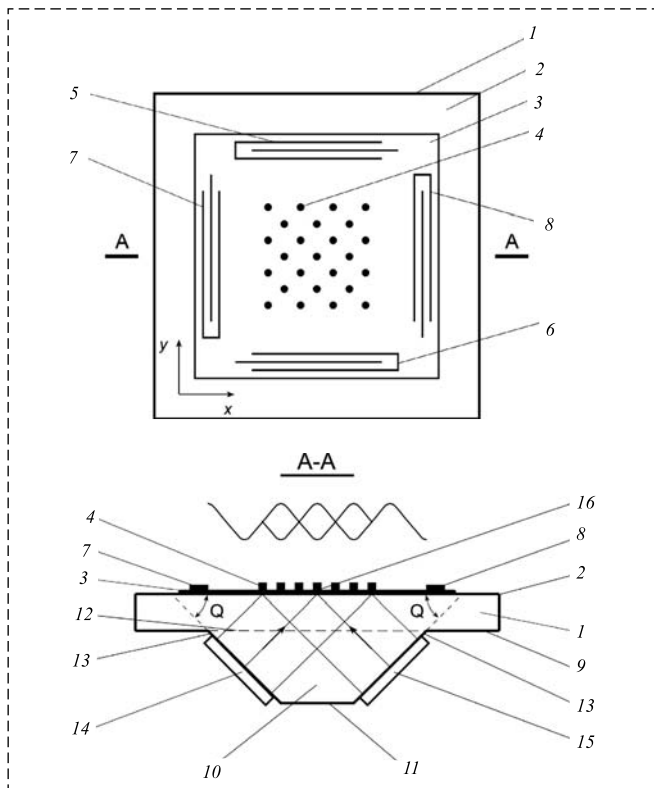


Рис. 3. Схема предлагаемого микроакустомеханического гироскопа

Fig. 3. Drawing of proposed micro-acoustical mechanical gyroscope

щее основание 1, выполненное из изотропного материала, на внешней поверхности 2 которого нанесена тонкая пленка 3 из пьезоэлектрика с установленными на ней регулярной структурой инерционных масс 4 и измерительными ВШП 5, 6 (относительно оси X) и 7, 8 (относительно оси Y) соответственно. Суммарное поле ПАВ от регулярной структуры инерционных масс 4 состоит из дифракционных и сигнальных от сил Кориолиса полей ПАВ.

На внутренней поверхности 9 несущего основания 1 выполнен трапецидальный выступ 10, имеющий малое основание 11, большее основание 12 и боковые поверхности 13, при этом большее основание 12 обращено в сторону внешней поверхности 2 несущего основания 1.

Боковые поверхности 13 трапецидального выступа 10 образуют с внешней поверхностью 2 несущего основания 1 угол Q , который выбирается из условия оптимального возбуждения ПАВ на внешней поверхности 2 несущего основания 1:

$$\sin Q = v_l / v_r,$$

где v_l — скорость продольных волн в материале несущего основания 1, v_r — скорость ПАВ.

Угол Q задан положением боковых поверхностей 13 трапецидального выступа 10 относительно внешней поверхности 2 несущего основания 1.

На боковых поверхностях 13 трапецидального выступа 10 симметрично друг другу установлены активные пьезоэлектрические преобразователи 14 и 15, которые обеспечивают возбуждение продольных акустических волн в материале несущего основания 1 в направлениях, определяемых углом Q .

Измерительные ВШП 5, 6 (относительно оси X) и 7, 8 (относительно оси Y) установлены на пленке 3 симметрично относительно положения регулярной структуры инерционных масс 4 и перпендикулярно осям вращения несущего основания 1.

Инерционные массы в регулярной структуре 4 размещены в шахматном порядке на расстоянии, обеспечивающем преимущественное излучение в направлении измерительных ВШП 5, 6 и 7, 8.

Принцип действия предлагаемого микроакустомеханического гироскопа заключается в следующем. Активные пьезоэлектрические преобразователи 14 и 15 возбуждают в несущем основании 1 продольные волны, которые при взаимодействии с его внешней поверхностью 2 возбуждают ПАВ, бегущие в разные стороны по оси X .

В области 16 интерференции пучков продольных волн на внешней поверхности 2 несущего основания 1 по месту размещения регулярной структуры инерционных масс 4 образуется стоячая волна с расстояниями между пучностями, равными $\lambda_R/2$, где $\lambda_R = v_R/f$; f — частота возбуждения.

Под воздействием стоячих волн инерциальные массы регулярной структуры 4 совершают вертикальные (вдоль оси Z) колебания и, в свою очередь, являются источниками ПАВ, которые распространяются вдоль осей X и Y .

Таким образом, из области 16 интерференции пучков продольных волн в стороны измерительных ВШП 5, 6 и 7, 8 распространяются бегущие волны, которые детектируются данными ВШП. В результате на выходах измерительных ВШП 5, 6 и 7, 8 возникают соответствующие сигналы.

При вращении несущего основания 1 относительно оси X на движущиеся вдоль оси Z массы воздействует сила Кориолиса, направленная вдоль оси Y :

$$F = 2m[\Omega \times V],$$

где m — масса колеблющейся структуры; Ω — угловая скорость вращения гироскопа; V — колебательная скорость массы.

Под воздействием этой силы генерируется дополнительная ПАВ, которая изменяет электрические сигналы на выходах ВШП 7 и 8. Это изменение пропорционально угловой скорости Ω , направленной вдоль оси X , и фиксируется соответствующим измерителем. На выходе ВШП 5 и 6 сигналы остаются практически неизменными.

При вращении несущего основания I относительно оси Y происходят аналогичные явления, а полезные сигналы возникают на выходах ВШП 5 и 6.

При одновременном вращении несущего основания I относительно осей X и Y полезные сигналы возникают на всех измерительных ВШП 5, 6 и 7, 8, причем уровень сигналов на выходах ВШП 7 и 8 соответствует его скорости вращения относительно оси X , а уровень сигналов на выходах ВШП 5, 6 соответствует скорости вращения относительно оси Y . Таким образом, регистрируются полезные сигналы, позволяющие определить скорости вращения несущего основания I относительно двух осей его вращения.

Предложенный гироскоп может быть изготовлен на подложке ниобата лития (LiNbO_3) $128^\circ Y$ -среза с рабочей частотой 15 МГц. Матрица миниатюрных навесных масс, размещенных в шахматном порядке, имеет размер 66×61 мкм. Масса каждой миниатюрной массы $\approx 1,5 \cdot 10^{-11}$ г. Расстояние между строками и столбцами миниатюрных масс $\lambda/4$. Апертура электродов ВШП 40λ . Ширина штыря ВШП $\lambda/4$. Число штырей 40. Скорость ПАВ 3961 м/с. Расчетный размер ТМГ на ПАВ — 25 мм в длину и 45 мм в ширину.

Математическое моделирование показывает, что при входном напряжении 0,1 В и угловой скорости 2π рад/с выходное напряжение на ВШП не превышает нескольких десятков микровольт.

Одной из нерешенных проблем, возникающих при проектировании рассмотренного ТМГ на ПАВ, является влияние вращения основания на параметры упругих волн, распространяющихся в конструкции из слоя на подложке. Подробное решение этой проблемы рассмотрено в приложении к данной статье и в работе [17].

Результаты имитационного моделирования

Полученные в приложении соотношения позволяют проводить численные исследования. Были рассчитаны коэффициенты отражения

для вращающейся конструкции из слоя с параметрами $V_{l2} = 6084$ м/с, $V_{l2} = 3568$ м/с, $\rho_2 = 7454$ кг/м³ и подложки из стекла $V_{l1} = 2700$ м/с, $V_{l1} = 1125$ м/с, $\rho_1 = 1180$ кг/м³ [18], где индекс "1" относится к параметрам подложки, а индекс "2" — к параметрам слоя. Вычисленные значения модуля и фазы коэффициента отражения $\Gamma_{\text{фр}}$ от угла падения продольной волны при различной скорости вращения для конструкции с толщиной слоя $h = 0,13\lambda$ и $h = 0,25\lambda$ (при $\Omega/\omega = 0$, $\Omega/\omega = -0,001$ и $\Omega/\omega = -0,01$) показывают, что комплексный коэффициент $\Gamma_{\text{фр}}$ меняет свое значение при вращении конструкции. Отметим, что это более ярко выражено в конструкции с $h = 0,25\lambda$ по сравнению с подложкой, имеющей слой толщиной $h = 0,13\lambda$.

Приведем также результаты расчета для полупространства в ситуации возникновения поверхностных волн Рэлея.

Об изменении скорости Рэлея при $h = 0$ в зависимости от вращения подложки с $q = 0,33$ ($q = k^2/\chi^2$, где k — волновое число продольных волн, а χ — волновое число поперечных волн) можно судить из графика на рис. 4, полученного из соотношения (7) (см. Приложение).

При малых скоростях вращения эта зависимость показана на рис. 4.

Как видно, скорость ПАВ увеличивается или уменьшается в зависимости от направления вращения $w = \Omega/\omega$.

О влиянии толщины слоя на изменение скорости Рэлея при $w = 0,01$ можно судить по графику на рис. 5.

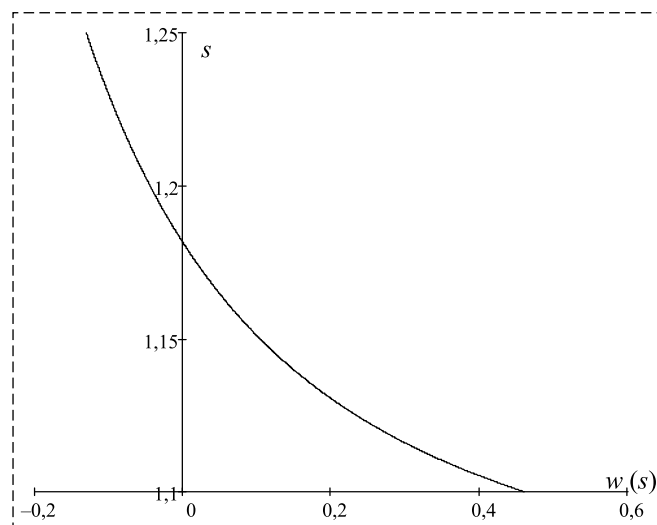


Рис. 4. Изменение скорости Рэлея в зависимости от угловой скорости вращения подложки при $q = 0,33$, $w = \Omega/\omega$, $s = \frac{V_l^2}{V_R^2}$

Fig. 4. Rayleigh speed change depending on substrate angular rotation rate at $q = 0,33$, $w = \Omega/\omega$, $s = \frac{V_l^2}{V_R^2}$

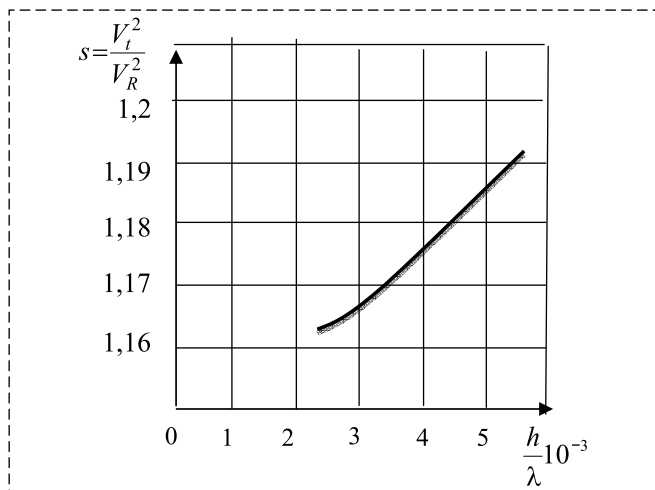


Рис. 5. Изменение скорости Рэлея при вращении подложки со скоростью $w = 0,01$ в зависимости от толщины слоя

Fig. 5. Rayleigh speed change at substrate rotation rate $w = 0,01$ depending on layer thickness

Как видно из рис. 5, при малых значениях $h/\lambda \ll 1$ (когда не возникают моды высшего порядка) имеет место линейная зависимость изменения скорости от h/λ .

На рис. 6 показана зависимость соотношения осей эллипса, по которому перемещаются частицы вблизи поверхности, от скорости вращения, а на рис. 7 приведены траектории движения этих частиц при $w = 0,08$, $w = 0$, $w = -0,08$.

Соотношение осей увеличивается или уменьшается в зависимости от направления

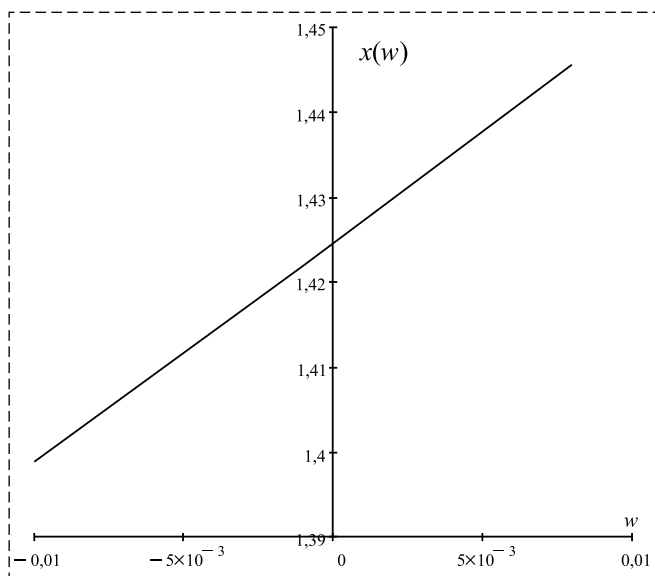


Рис. 6. Зависимость отношения $x(w) = \frac{b(w)}{a(w)}$ большой оси b к малой оси a от скорости вращения основания $w = \Omega/\omega$ для $q = 1/3$.

Fig. 6. Dependence of relation $x(w) = \frac{b(w)}{a(w)}$ of major axis b to minor axis a on substrate rotation rate $w = \Omega/\omega$ for $q = 1/3$

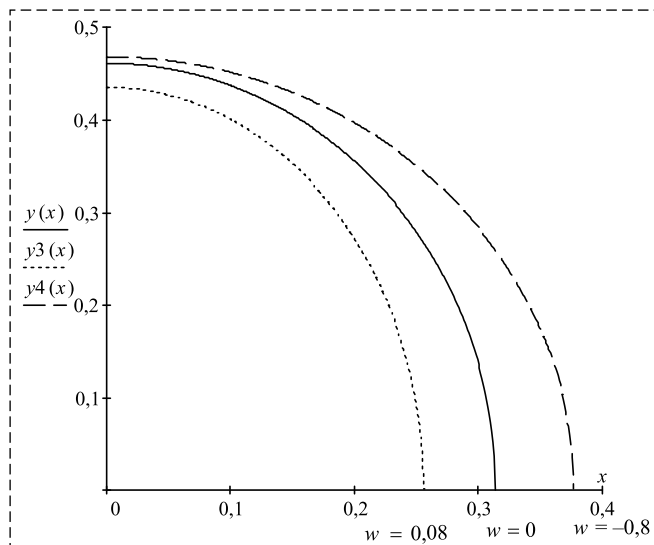


Рис. 7. Траектория движения частиц при $w = -0,08$, $w = 0$, $w = 0,08$, $w = \Omega/\omega$

Fig. 7. Particle movement paths at $w = -0,08$, $w = 0$, $w = 0,08$, $w = \Omega/\omega$

вращения, что можно использовать для его определения. По этим же графикам также можно найти и скорость вращения основания.

Из рисунков видно, что скорость вращения подложки влияет как на амплитуду колебаний частиц, так и на форму эллиптической траектории.

Следует заметить, что отношение сигнал—шум на входе электронной части в гироскопах, использующих изменение параметров ПАВ при вращении, зависит от величины Ω/ω и может меняться в диапазоне от нескольких единиц микровольт до нескольких десятков микровольт при скоростях вращения управляемого средства поражения от ± 1000 %/с до ± 2000 %/с и более [4–7]. При этом отношение сигнал—шум не будет превышать единиц микровольт.

В завершении кратко остановимся на технологии изготовления ТМГ на ПАВ.

Особенности технологии изготовления ТМГ на ПАВ

Основным конструктивным элементом гироскопов на ПАВ является кварцевая пластина с напыленной на нее топологией [19]. Процесс ее формирования базируется на технологии фотолитографии (рис. 8).

На первом этапе (рис. 8, а, б) пластина из ниобата лития покрывается слоем алюминия толщиной 300 нм. Поверх него наносится слой фоторезиста AZ 1512 толщиной 1 мкм, на котором после экспонирования создается шаблон топологии ПАВ-резонатора (рис. 8, в). На

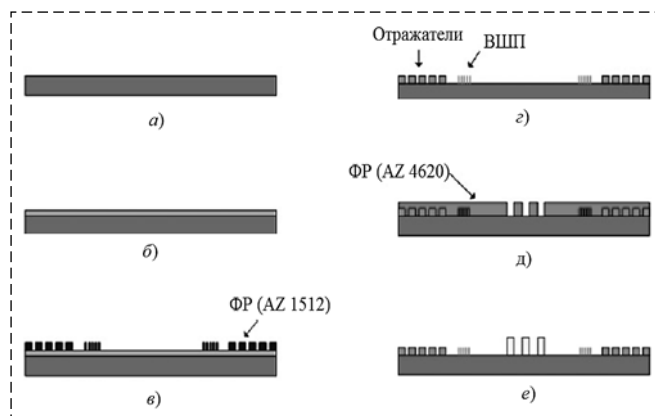


Рис. 8. Процесс нанесения топологии ТМГ на ПАВ:

a — подложка из ниобата лития; *б* — нанесение алюминия; *в* — нанесение фоторезиста и создание шаблона резонатора; *г* — травление алюминия и удаление фоторезиста; *д* — шаблон фоторезиста для напыления слоя хрома/золота; *е* — нанесение слоя хрома/золота и удаление фоторезиста

Fig. 8. Topology application process for the SAW SMG:

a — lithium niobate substrate; *b* — application of aluminum; *в* — applying the photoresist and forming the resonator template; *г* — pickling the aluminum and removing the photoresist; *д* — photoresist template for chromium/gold layer application; *е* — application of chromium/gold layer and removal of photoresist (Отражатели — Reflectors; ВШП — IDT; ФР — PR)

следующем этапе лишний алюминий вытравливается жидким растворителем, а фоторезист смывается с помощью ацетона (рис. 8, *г*). Далее наносится слой нового фоторезиста AZ 4620 толщиной 10 мкм, формирующий маску для нанесения инерционных масс из золота (рис. 8, *д*). Для лучшей адгезии золотое покрытие наносится не на поверхность кристалла, а на промежуточный слой хрома. На завершающем этапе производства оставшийся фоторезист смывается ацетоном (рис. 8, *е*).

Описанный технологический процесс является типовым для производства различных структур на ПАВ: резонаторов, линий задержки, фильтров и др. Таким образом, изготовление гироскопов на ПАВ не требует введения

новых производственных линий и имеет широкие возможности для массового производства.

В таблице дана сопоставительная оценка параметров лабораторных макетов ТМГ на ПАВ и серийно выпускаемых ММГ [20].

Выводы

1. Разработанная схема двухосевого ТМГ на ПАВ обеспечивает измерение абсолютной угловой скорости вращения несущего основания относительно двух осей. Отсутствие в рассмотренном гироскопе торсионных подвесов, свойственных традиционным ММГ, делает его устойчивым к перегрузкам, достигающим 65 000 g. Это преимущество делает приоритетным использование ТМГ на ПАВ в системах навигации ракет, высокоточных управляемых авиационных бомб и артиллерийских снарядов.

2. Полученная аналитическая модель позволяет проводить численный анализ влияния вращения несущего основания на параметры упругих волн, распространяющихся в конструкции из слоя на подложке, выполненной из различных материалов. Ее использование применительно к предложенной схеме ТМГ на ПАВ обеспечивает достижение поставленной в работе цели.

3. Как следует из результатов моделирования, наличие вращения существенно изменяет комплексные коэффициенты отражения объемных волн от слоя на подложке. В случае распространения ПАВ вращение приводит к изменению фазовой скорости и, следовательно, к изменению частоты. Кроме того, при вращении основания изменяется амплитуда колебаний частиц, участвующих в переносе ПАВ, а также форма эллиптической траектории движения частиц. Все эти факторы необходимо учитывать при конструировании твердотельных микрогироскопов на акустических волнах.

Сопоставительная оценка параметров лабораторных макетов ТМГ на ПАВ и серийно выпускаемых ММГ

Parameter comparison: SMG on SAW prototypes vs commercial MMGs

Параметр	ТМГ с двойным преобразованием	ТМГ на 2 ЛЗ (ПАВ с горизонтальной поляризацией)	ТМГ на 2 ЛЗ (ПАВ с вертикальной поляризацией)	ADXRS 401	ADXRS 300
Масштабный коэффициент	119 Гц/...°/с	1,268 Гц/...°/с	0,431 Гц/...°/с	15 мВ/...°/с	5 мВ/...°/с
Нелинейность, % от диапазона	7,6	0,22	-	0,1	0,1
Диапазон	± 1000	±2000	±2000	±75	±300
Температурная чувствительность	—	0,28 Гц/°С	0,08 Гц/°С	8,4 мВ/К	
Предельная чувствительность, %/с	0,008	0,79	2,32	0,07	0,2
Время готовности	—	20 мин	100 с	35 мс	35 мс
Материал звукопровода	LiNbO3 срез 128° YX	Кварц срез ST-90° X	Кварц срез ST	—	—

Список литературы

1. Пешехонов В. Г. Проблемы и перспективы современной гироскопии // Изв. ВУЗ. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 49—55.
2. Волынец А. А., Дудко Л. А., Казаков Б. А., Козлов В. В. и др. Опыт создания высокоточных поплавковых гироскопов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций // Гироскопия и навигация. 2004. № 1 (44). С. 45—57.
3. Доронин В. П., Мезенцев А. П., Новиков Л. З., Решетников В. И. и др. Гироскопические чувствительные элементы для систем управления ориентацией и стабилизации орбитальных космических аппаратов // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор". 2001. С. 17—29.
4. Barbour N., Anderson R., Connelly J., Hanson D., Kourepnis A., Sitomer J., Ward P. Inertial MEMS System Applications // RTO lecture series 232. 2004. Preprints.
5. Coskren D., Easterly T., Polutcho R. Low-Cost GPS/INS Guidance for Navy Munitions Launches, GPS World, Vol 16, Issue 9, September 2005.
6. Гришин Ю. Пути совершенствования артиллерийского вооружения основных боевых кораблей ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 4. С. 78—83.
7. Русинов В. Артиллерийские боеприпасы повышенной точности: история, состояние, развитие // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 6. С. 48—53.
8. Русинов В. Артиллерийские боеприпасы повышенной точности: история, состояние, развитие // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 7. С. 44—50.
9. Ильин С. Управляемое авиационное оружие малого калибра // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 12. С. 59—64.

10. Калиничев Б. Основные направления развития за рубежом реактивных систем залпового огня // Зарубежное военное обозрение. 2015. № 11. С. 51—59.
11. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. Тула: Изд. Тул. гос. университета, 2002. 389 с.
12. Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В., Шевченко С. В., Шевелько М. М. и др. Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // Гироскопия и навигация. 2011. № 3(74). С. 75—87.
13. Kurosawa M., Fukuda Y., Takasaki M., Higuchi T. A surface-acoustic-wave gyro sensor // Sensors Actuators, vol. A66, no. 1, pp. 33—39, 1998.
14. Патент № 2543706, Россия, 2015. Микроакустомеханический гироскоп / Вахтин Ю. В., Мирошниченко И. П., Сизов В. П., Погорелов В. А.
15. Patent № 6516665 B1, US, 2003. Micro-electro-mechanical gyroscope / V. K. Varadan, P. B. Xavier, W. D. Suh, J. S. Kol-lakompil et al.
16. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
17. Сизов В. П., Погорелов В. А., Вахтин Ю. В. Влияние вращения на параметры упругих волн, распространяющихся в подложке твердотельного гироскопа на акустических волнах // Гироскопия и навигация. 2015. № 4(91). С. 77—90.
18. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1980. 280 с.
19. Wang W., Oh H., Lee K., Yoon S., Yang S. Enhanced Sensitivity of Novel Surface Acoustic Wave Microelectromechanical System-Interdigital Transducer Gyroscope // JJAP. 2009. № 48.
20. Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2015. 316 с.

Приложение

Определение влияния вращения ТМГ на ПАВ на параметры упругих волн

Рассмотрим конструкцию, состоящую из слоя толщиной h на полубесконечной подложке (рис. П1). Вращающаяся вокруг оси y с постоянной угловой скоростью Ω конструкция возбуждается упругими волнами, падающими из полупространства на слой под углом θ . Будем считать, что поле не зависит от координаты y .

Возникающие волны должны удовлетворять уравнениям движения во вращающейся системе координат и граничным условиям свободной поверхности слоя при $z = h$, а также условиям жесткой склейки слоя с полупространством $z = 0$.

Для гармонических волн уравнение движения в изотропной вращающейся среде, пренебрегая центробежными силами, запишем следующим образом [11]:

$$\omega^2 \rho u + (\lambda + \mu) \text{grad} \text{div} u + \mu \Delta u = -i\omega \rho 2[\Omega \times u], \quad (1)$$

где u — вектор перемещений; λ , μ — упругие константы Ламе; ω — частота; ρ — плотность

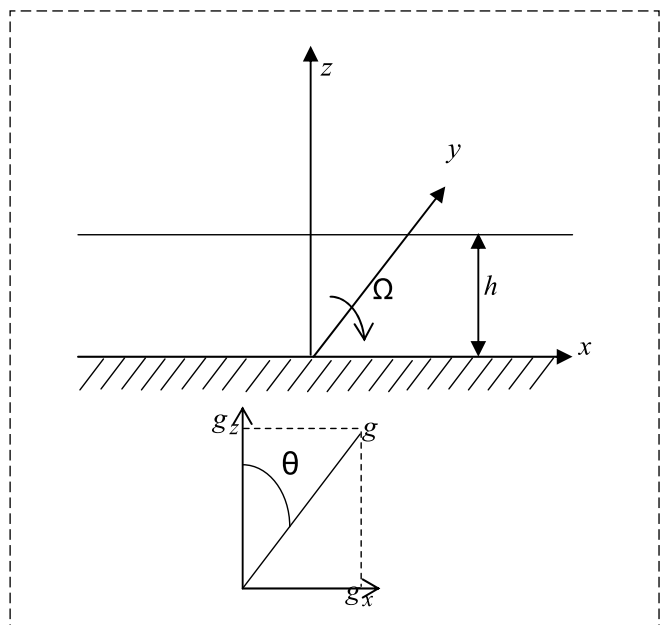


Рис. П1. Конструкция в виде слоя толщиной h на полубесконечной подложке

Fig. P1. Structure represented by h -thickness layer on semi-infinite substrate

материала. В правой части этого уравнения выражен вектор плотности сил Кориолиса.

Для компонент перемещений, поляризованных в плоскости падения волн ($y = 0$), из уравнения (1) получим:

$$\frac{\omega^2 \rho}{\mu} u_z + \frac{\lambda + \mu}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \Delta u_z = i \frac{\omega^2 \rho}{\mu} \frac{\Omega}{\omega} u_x, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\omega^2 \rho}{\lambda + 2\mu} + \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_x + \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = -i \frac{2\omega^2 \rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\Omega}{\omega} u_z. \quad (3)$$

Компоненты напряжения могут быть определены из закона Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x^k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Здесь δ_{ij} — символ Кронекера. По повторяющемуся индексу (k) необходимо провести суммирование.

Используя метод скаляризации, следуя [12], представим перемещение через потенциальные функции для продольных волн φ и поперечных W в виде

$$u_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \varphi - \frac{i}{g_x} \left(\delta_{iz} g^2 + \frac{\partial^2}{\partial z \partial x_i} \right) W. \quad (5)$$

Потенциалы φ и W являются решением волновых уравнений Гельмгольца

$$\Delta \left(\frac{\varphi}{W} \right) + g^2 \left(\frac{\varphi}{W} \right) = 0, \quad (6)$$

где $g = \omega/V_\phi$, V_ϕ — фазовая скорость продольных или поперечных волн при вращении полупространства.

Общее решение этих уравнений представляется в виде падающих и отраженных волн. Используя это решение, можно найти элементы C_{ij} [17], через которые могут быть выражены компоненты перемещений следующим образом:

$$\begin{aligned} u_z &= A_0 \left(C_{(11)} C_{(42)} e^{i g_z^{(L)} z} - C_{(12)} C_{(41)} e^{i g_z^{(T)} z} \right) e^{-i \omega t} e^{i g_x x}, \\ u_x &= A_0 \left(C_{(21)} C_{(42)} e^{i g_z^{(L)} z} - C_{(22)} C_{(41)} e^{i g_z^{(T)} z} \right) e^{-i \omega t} e^{i g_x x}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $g_z^{(L)}$ и $g_z^{(T)}$ — проекции волнового вектора на ось z для продольных и поперечных волн соответственно; g_x — проекция волнового вектора на ось x , которая в силу закона Снеллиуса одинакова для продольных и поперечных волн.

Для поверхностных волн, убывающих при удалении от границы, величины g_z являются мнимыми $g_z^{(L)} = i \alpha$, $g_z^{(T)} = i \alpha$, и вещественные значения u_z и u_x описывают траекторию частиц, участвующих в переносе ПАВ.

Движение частиц вблизи поверхности может быть найдено из (8) при $z = 0$.

Two-Axis Solid-State Microgyroscope on Surface Acoustic Waves

V. P. Sizov¹, valpalsiz@yandex.ru, V. A. Pogorelov^{1,2}, vadim.pogorelov.rnd@gmail.com,

Yu. V. Vakhtin¹, wyw_rost@mail.ru,

¹ Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

² People's Friendship University of Russia (RUDN) University, Institute of innovative engineering technologies, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: **Pogorelov Vadim A.**, Ph. D., Associate Professor, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation, e-mail: vadim.pogorelov.rnd@gmail.com

Accepted on February 04, 2019

Abstract

This article focuses on the development of a two-axis solid state micro gyroscope (SMG) on surface acoustic waves (SAW). The described gyroscope belongs to the category of inexpensive sensing elements featuring a high degree of long-time overload stability. This advantage seems to make SAW SMGs a priority choice for navigation and control systems functioning in severe overload environments of up to 65,000 g. As of today SAW SMGs are designed according to a number of known principles. Such SMGs may also operate on standing SAWs or traveling SAWs. This article addresses the first gyro type. Unfortunately, the existing standing SAW SMGs share a common limitation of measuring angular rates in rela-

tion to one axis only. This research attempts to introduce an innovative two-axis standing SAW SMG. The influence of the basis rotation on the parameters of the elastic waves traveling within the substrate layer was carefully studied. Incident and reflected wave models were also elaborated. The numerical simulation results demonstrate the effects of the basis rotation on the complex factors of the volume waves reflected by the substrate layer and on the phase velocity and frequency thereof as well as on the oscillation amplitude of the particles involved in SAW transition, and on the elliptical particle movement path configuration. Also, the SAW SMG is compared to the existing micromechanical gyroscopes, and the basic SAW SMG production technologies are reviewed.

Keywords: micromechanical gyroscope, acoustic waves, surface acoustic waves

Acknowledgements: The publication has been prepared with the support of the "RUDN University Program 5-100".

For citation:

Sizov V. P., Pogorelov V. A., Vakhtin Yu. V. Two-Axis Solid-State Microgyroscope on Surface Acoustic Waves, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 299–307.

DOI: 10.17587/mau.20.299-307

References

1. Peshekhonov V. G. Problemy i perspektivy sovremennoj giroskopii (Problems and Prospects of Modern Gyroscopics), *Izv. VUZ. Priboroostroenie*, 2000, vol. 43, no. 1–2, pp. 49–55 (in Russian).
2. Volyncey A. A., Dudko L. A., Kazakov B. A., Kozlov V. V. et al. Opyt sozdaniya vysokotochnykh poplavykh giropriborov, primenyaemykh v sistemah uglovoj orientatsii i stabilizatsii kosmicheskikh apparatov i stancij (The Experience of Creating High Precision Floated Gyroscopes for Use in Angular Orientation and Stabilization of Space Vehicles), *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2004, no. 1 (44), pp. 45–57 (in Russian).
3. Doronin V. P., Mezencev A. P., Novikov L. Z., Reshetnikov V. I. et al. Giroskopicheskie chuvstvitel'nye ehlementy dlya sistem upravleniya orientatsiej i stabilizatsii orbital'nykh kosmicheskikh apparatov (Gyroscopic Sensing Elements for Orbit Space Vehicles' Orientation Stabilization Control Systems), *VIII Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam*, SPb., CNII "Ehlektropribor", 2001, pp. 17–29 (in Russian).
4. Barbour N., Anderson R., Connelly J., Hanson D., Kourepennis A., Sitomer J., Ward P. Ward Inertial MEMS System Applications / RTO lecture series 232 (2004) pre-prints.
5. Coskren D., Easterly T., Polutchko R. Low-Cost GPS/INS Guidance for Navy Munitions Launches, *GPS World*, Vol. 16, Iss. 9, September 2005.
6. Grishin Yu. Puti sovershenstvovaniya artillerijskogo vooruzheniya osnovnykh boevykh korabley VMS SSHA (Ways of Improving of US Navy Main Battleship Artillery Armaments), *Zarubezhnoe Voennoe Obozrenie*, 2011, no. 4, pp. 78–83 (in Russian).
7. Rusinov V. Artillerijskie boeprisy povyshennoj tochnosti: istoriya, sostoyanie, razvitie (Increased Accuracy Artillery Munitions: History, Current State, Development), *Zarubezhnoe Voennoe Obozrenie*, 2012, no. 6, pp. 48–53 (in Russian).
8. Rusinov V. Artillerijskie boeprisy povyshennoj tochnosti: istoriya, sostoyanie, razvitie (Increased Accuracy Artillery Munitions: History, Current State, Development) *Zarubezhnoe Voennoe Obozrenie*, 2012, no. 7, pp. 44–50 (in Russian).
9. Il'in S. Upravlyaemoe aviacionnoe oruzhie malogo kalibra (Guided Small Caliber Aviation Weapons), *Zarubezhnoe Voennoe Obozrenie*, 2012, no. 12, pp. 59–64 (in Russian).
10. Kalinichev B. Osnovnye napravleniya razvitiya za rubezhom reaktivnykh sistem zalpovogo ognia (Main Guidelines of Multiple-Launch Rocket System Development in Foreign Countries), *Zarubezhnoe Voennoe Obozrenie*, 2015, no. 11, pp. 51–59 (in Russian).
11. Raspopov V. Ya. Mikromekhanicheskie pribory (Micromechanical Instruments), Tula, Tul. gos. universitet. 2002, 389 p. (in Russian).
12. Luk'yanov D. P., Filatov Yu. V., Shevchenko S. V., Shevel'ko M. M. et al. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya tverdotel'nykh mikrogiroskopov na poverhnostnykh akusticheskikh volnah (Current State and Development Prospects of Solid State Gyroscopes on Surface Acoustic Waves), *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2011, no. 3(74), pp. 75–87 (in Russian).
13. Kurosawa M., Fukuda Y., Takasaki M., Higuchi T. A surface-acoustic-wave gyro sensor // *Sensors Actuators*, vol. A66, no. 1, pp. 33–39, 1998.
14. Patent № 2543706, Rossiya, 2015. Mikroakustomekhanicheskij giroskop (Micro-Acoustic-Mechanical Gyroscope), Vahtin YU. V., Miroshnichenko I. P., Sizov V. P., Pogorelov V. A. (in Russian).
15. Patent № 6516665 B1, US, 2003. Micro-electro-mechanical gyroscope, V. K. Varadan, P. B. Xavier, W. D. Suh, J. S. Kolakompil et al. (in Russian).
16. Novackij V. Teoriya uprugosti (Theory of elasticity), Moscow, Mir, 1975, 872 p. (in Russian).
17. Sizov V. P., Pogorelov V. A., Vahtin Yu. V. Vliyanie vrashcheniya na parametry uprugih voln, rasprostranyayushchihysya v podlozhke tverdotel'nogo giroskopa na akusticheskikh volnah (Influence of Rotation on the Acoustic Wave Parameters of the Acoustic Waves Traveling in the Solid State Acoustic Gyroscope Substrate), *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2015, no. 4(91), pp. 77–90 (in Russian).
18. Shutilov V. A. Osnovy fiziki ul'trazvuka (Fundamentals of Ultrasound Physics), Leningrad, Izdatel'stvo leningradskogo universiteta, 1980, 280 p. (in Russian).
19. Wang W., Oh H., Lee K., Yoon S., Yang S. Enhanced Sensitivity of Novel Surface Acoustic Wave Microelectromechanical System-Interdigital Transducer Gyroscope, *JJAP*, 2009, no. 48.
20. Luk'yanov D. P., Raspopov V. Ya., Filatov Yu. V. Prikladnaya teoriya giroskopov (The Gyroscope Applied Theory), SPb., GNC RF OAO "Koncern "CNII "EHlektropribor", 2015, 316 p. (in Russian).