

УДК 681.586.5

В.И. Бусурин, В.В. Коробков, Йин Наинг Вин

## Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Предложены структура и математическая модель трёхосевого кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Определена функция преобразования трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости. Исследовано влияние параметров кольцевого резонатора на частоту собственных колебаний и второе движение, а также оптоэлектронного модулятора на отражательную способность, мощность фотоприемника и выходное напряжение.

**Ключевые слова:** кольцевой волновой резонатор, трёхосевой оптоэлектронный преобразователь, угловая скорость, оптическое туннелирование, частота собственных колебаний, функция преобразования, зазор, радиальное движение.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-4-43-49

Преобразователи угловых скоростей широко используются в системах управления различных подвижных объектов и в качестве индикаторов углового вращения. При построении многоосевого преобразователя угловых скоростей используют несколько одноосевых преобразователей угловых скоростей в желаемой конфигурации. Однако если есть возможность использования одного резонатора для многоосевого измерения угловых скоростей, то это более эффективно. В статье рассмотрена возможность многоосевого измерения угловых скоростей с оптическим съёмом первичной информации и одним кольцевым резонатором. Исследовано влияние конструктивных параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.

### Функциональная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Основным элементом преобразователя является чувствительный элемент (ЧЭ). Частный случай ЧЭ датчика угловой скорости (ДУС) с распределёнными параметрами – это кольцевой резонатор, который совершает колебания в направлении, соответствующем основной колебательной моде. Кольцевой резонатор (КР) – это тонкое упругое кольцо, которое совершает колебательное движение в своей плоскости. Если на кольцевой резонатор воздействуют только постоянные вибрации без угловой скорости, то он принимает форму эллипса. При вибрации кольцевой резонатор, растягиваясь в противоположные стороны, а затем сжимаясь, постоянно меняет свою эллиптичность, сохраняя положение главных осей. Такое состояние называется первым режимом (рис. 1, а). Первый режим может возбуждаться с помощью генераторов различных типов: электромагнитных, электростатических, пьезоэлектрических [1].

Ускорение Кориолиса, возникающее из-за угловых скоростей, вызывает распределение в плоскости сил инерции вокруг кольца. Эти силы вызывают вторые режимы (рис. 1, б и в). Во вторых режимах

движение кольцевого резонатора пропорционально измеряемой угловой скорости, поэтому величины амплитуд вторых движений определяют измеряемую величину угловой скорости относительно соответствующей оси [2].

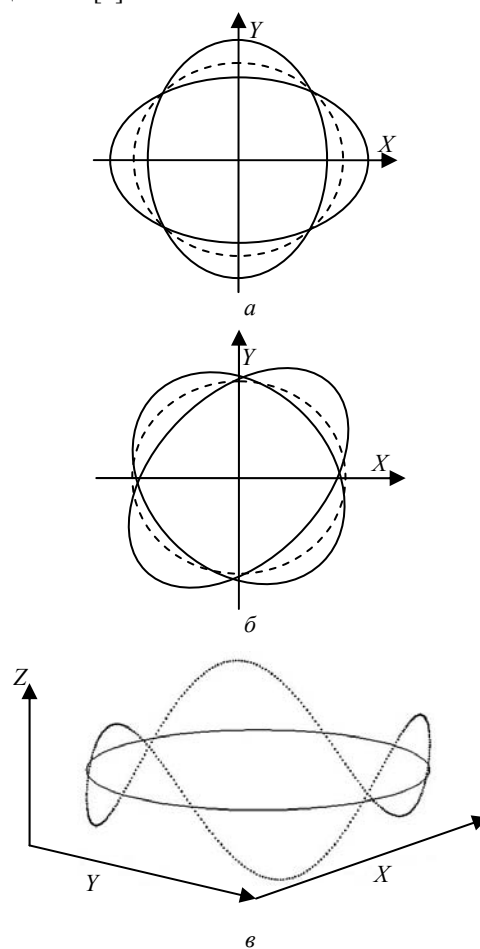


Рис. 1. Первый режим (а) и вторые режимы движения при измерении угловых скоростей:  $\Omega_z$  (б),  $\Omega_x$  и  $\Omega_y$  (в)

На рис. 2 представлена структурная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразова-

теля угловой скорости, в которой использованы: источник излучения (ИИ), кольцевой резонатор (КР), модуляторы на основе оптического туннельного эффекта (МОТЭ), фотоприемники (ФП), электронный блок обработки (ЭБ).

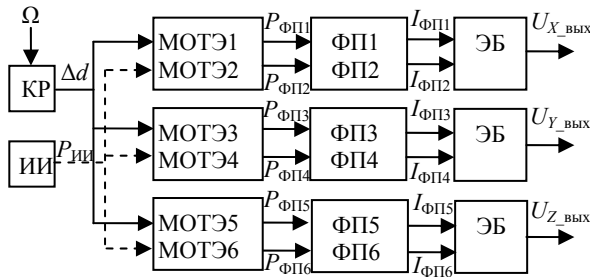


Рис. 2. Структурная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

При существующей угловой скорости ( $\Omega_z$ ) точки в плоскости кольца ( $45, 135, 225$  и  $315^\circ$  относительно главных осей) показывают величину измеряемой угловой скорости. В точках на плоскости кольца ( $0, 60, 120, 180, 240$  и  $300^\circ$  для  $\Omega_x$  и  $30, 90, 150, 210, 270$  и  $330^\circ$  для  $\Omega_y$ ) определяются измеряемые угловые скорости. Для уменьшения требуемой амплитуды движений и исключения сил электростатического притяжения для съема информации о движении во вторых режимах вместо традиционных емкостных датчиков микроперемещений используются 3 пары оптических считывающих узлов, которые определяют величины и направления вторых движений. Система съема информации трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей состоит из оптических считывающих узлов. Эти оптические считывающие узлы размещаются вдоль дополнительных осей под углом  $45$  и  $135^\circ$  в плоскости кольца (П1-П2) для  $\Omega_z$  и вдоль дополнительных осей под углом  $180, 360^\circ$  под плоскостью кольца (П3-П4) для  $\Omega_x$  и  $90, 270^\circ$  над плоскостью кольца (П5-П6) для  $\Omega_y$  (рис. 3).

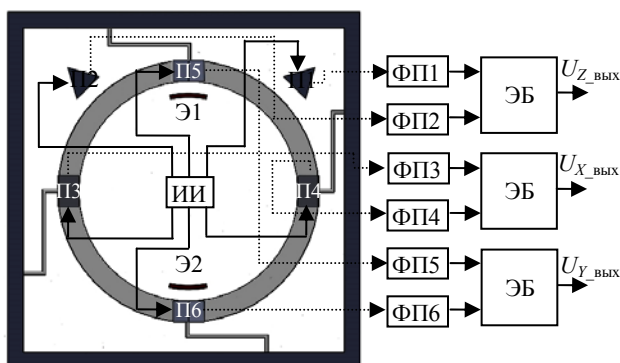


Рис. 3. Функциональная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Для обеспечения измерения угловой скорости по трем осям необходимо произвести выбор параметров резонатора, обеспечивающий эффективное

считывание первичной информации с помощью оптического туннелирования «в плоскости» и «на плоскости» кольцевого резонатора.

#### Анализ амплитуды первого движения и собственных частот колебания резонатора трехосевого кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

При возбуждении резонатор имеет форму стоячей волны. При отсутствии угловой скорости кольцевого резонатор принимает в режиме ( $\cos 2\theta$ ) и вибрирует с определенной частотой. Такое состояние называется первым режимом. Первый режим может возбуждаться с помощью метода позиционного возбуждения. Для обеспечения возбуждений кольцевого резонатора применяется позиционное возбуждение, которое реализуется с помощью пары электродов. Внутренняя поверхность кольцевого резонатора и электроды покрыты тонким электропроводящим слоем, поэтому кольцевой резонатор и электрод являются обкладками цилиндрического конденсатора. На пару противоположных электродов подается переменное электрическое напряжение с определенной частотой, которая меньше, чем собственная частота, в 2 раза [3].

На рис. 4 приведены зависимости отражательной способности сред от расстояния между призмой и кольцевым резонатором при следующих параметрах: угол падения излучения  $\theta = 42^\circ$ ,  $n_1 = 1,52$ ,  $n_2 = 1$  и  $\lambda = 900$  нм. На графике показаны также увеличенные изображения амплитуд вторых движений по времени при толщине КР  $t = 300$  мкм и диаметре КР  $D = 5$  мм.

Таким образом, целесообразно выбирать начальный зазор между призмой и кольцевым резонатором в диапазоне  $200-600$  нм при первом движении  $10-60$  мкм, обеспечивающий необходимую максимальную величину вторых движений и зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

Величина выходного сигнала в схемах с кольцевым волновым резонатором зависит от частоты его колебаний. Частоты колебаний резонатора зависят от его размеров и числа кванторов ( $n$ ), а также от плотности и модуля упругости материала. Частота собственных колебаний второго режима «в плоскости» определяется как [4]:

$$f_1 = \frac{n(n^2 - 1)}{\pi \cdot D^2 \sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{E \cdot t^2}{3 \cdot \rho}},$$

где  $E$  – модуль упругости (Юнга);  $t$  – толщина кольца;  $h$  – высота кольца;  $\rho$  – плотность материала;  $D$  – диаметр кольца;  $n$  – узловый диаметр.

Для частоты собственных колебаний второго режима «на плоскости» частота собственных колебаний определяется как

$$f_2 = \frac{2 \cdot n \cdot h \cdot (n^2 - 1)}{\pi \cdot D^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho \left( 12 \cdot n^2 + 6,67 \cdot \left( 1 + \frac{h^2}{t^2} \right) \cdot (1 + \nu) \right)}},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

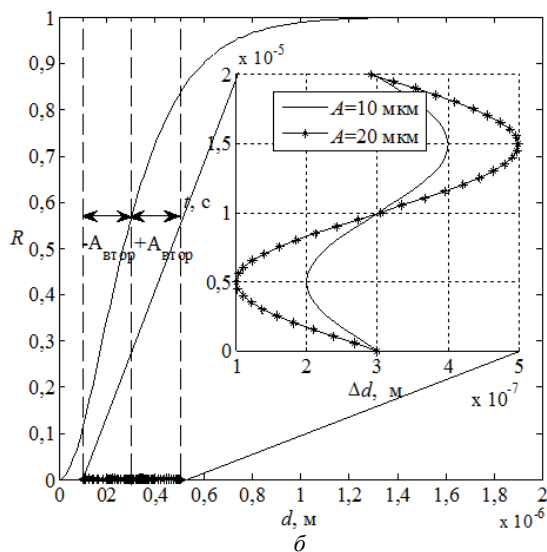
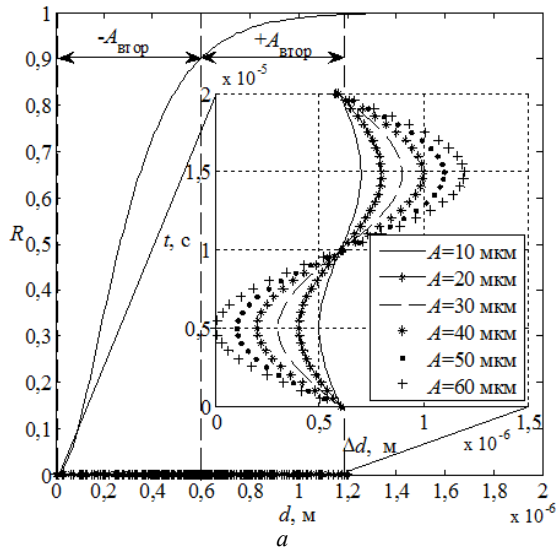


Рис. 4. Определение диапазона второго движения при  $d_0 = 0,6$  мкм, первое движение  $A = 10-60$  мкм (а) при  $d_0 = 0,3$  мкм, первое движение  $A = 10-20$  мкм (б)

Для правильного функционирования КР необходимо, чтобы частота собственных колебаний режима «в плоскости» и режима «на плоскости» имели одинаковую резонансную частоту [2]. Разностная частота собственных колебаний ( $F = f_1 - f_2$ ) зависит от значений толщины и ширины кольца (рис. 5).

Для одинаковой резонансной частоты собственных колебаний второго режима «в плоскости» и второго режима «на плоскости» определено отношение высоты к толщине кольцевого резонатора (рис. 6, а). Когда частоты собственных колебаний второго режима «в плоскости»  $f_1$  и второго режима «на плоскости»  $f_2$  равны, должно выполняться соотношение между толщиной и шириной КР в виде:  $h \approx 0,35t$  (рис. 6, б). При таком соотношении ( $h \approx 0,35t$ ) появляется возможность эффективного измерения угловых скоростей по трем осям при использовании одного резонатора.

Таким образом, целесообразно выбирать толщину и высоту КР порядка сотни микрометров, что обеспечивает необходимую максимальную величину

вторых радиальных движения и изменений зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

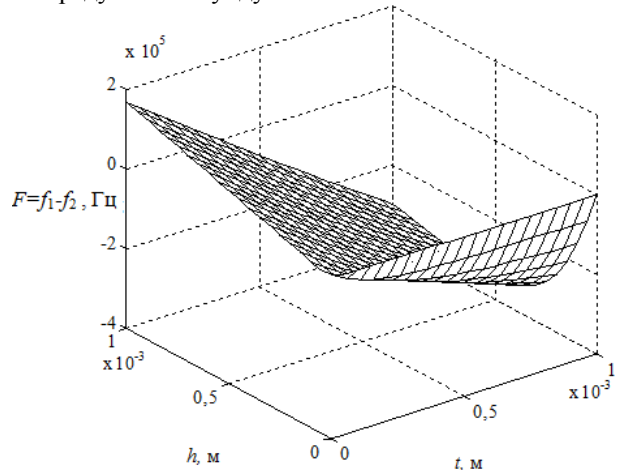


Рис. 5. Разностная частота собственных колебаний при разных величинах толщины и высоты кольцевого резонатора

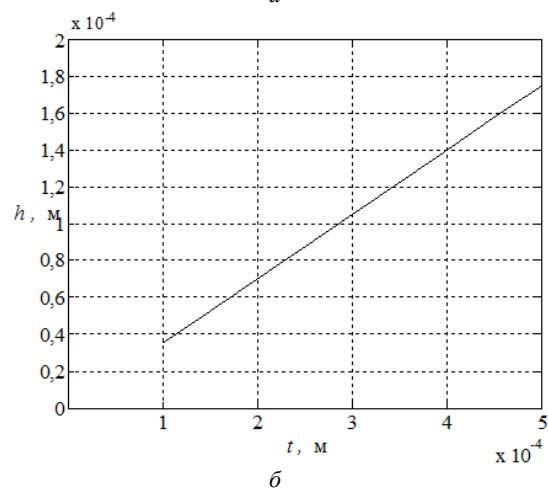
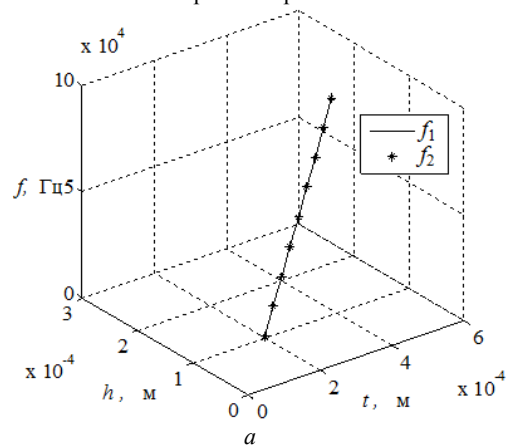


Рис. 6. Соотношение между высотой и толщиной КР, при котором  $f_1$  и  $f_2$  равны (а) и зависимость высоты от толщины в виде:  $h \approx 0,35t$  (б)

### Исследование влияния измерений конструктивных параметров кольцевого резонатора на амплитуды вторых движений

Возникающие под действием угловой скорости силы Кориолиса деформируют кольцевой резонатор, являясь причиной дополнительного второго движе-

ния. Зная амплитуду второго движения, можно определить направление и величину угловой скорости. Второе радиальное движение кольцевого резонатора зависит от угловой скорости вращения  $\Omega$ , амплитуды постоянных вибраций  $A$ , частоты колебаний и демпфирования  $\gamma$ . Амплитуды вторых движений могут быть определены по формулам [5]

$$\Delta d_Z(\Omega_Z) = \frac{2 \cdot n \cdot \Omega_Z \cdot A}{(n^2 + 1) \cdot \gamma \cdot f_1},$$

$$\Delta d_X(\Omega_X) = \frac{\Omega_X \cdot i \cdot A}{2 \left[ 1 + \left( \frac{I_X}{t \cdot h} \right) \cdot i^4 \cdot \xi^2 \right] \cdot \gamma \cdot f_2},$$

$$\Delta d_Y(\Omega_Y) = \frac{\Omega_Y \cdot i \cdot A}{2 \left[ 1 + \left( \frac{I_Y}{t \cdot h} \right) \cdot i^4 \cdot \xi^2 \right] \cdot \gamma \cdot f_2},$$

где  $A$  – амплитуда первого радиального движения.

Изменяя геометрические параметры кольцевого резонатора, определим их влияние на вторые движения. Зависимость амплитуды вторых движений КР от угловых скоростей при изменении толщины кольцевого резонатора приведена на рис. 7 для следующих параметров: первое радиальное движение  $A = 50$  мкм, модуль упругости (Юнга)  $E = 1,65 \cdot 10^{11}$  Па, плотность материала  $\rho = 2330$  кг/м<sup>3</sup>.

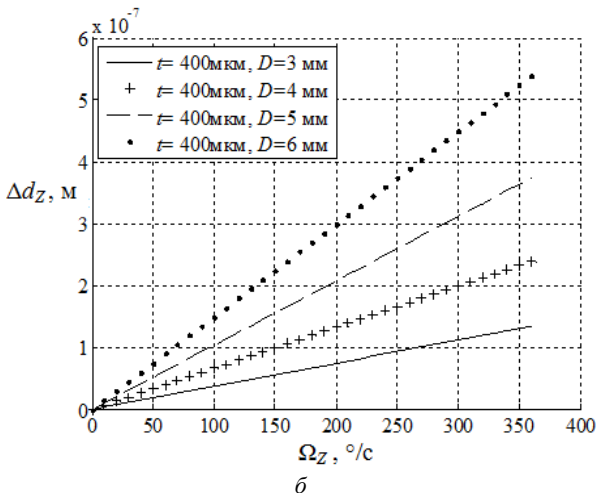
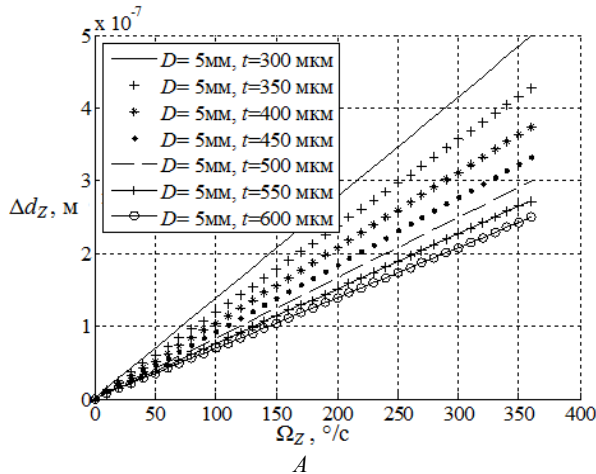


Рис. 7 (начало)

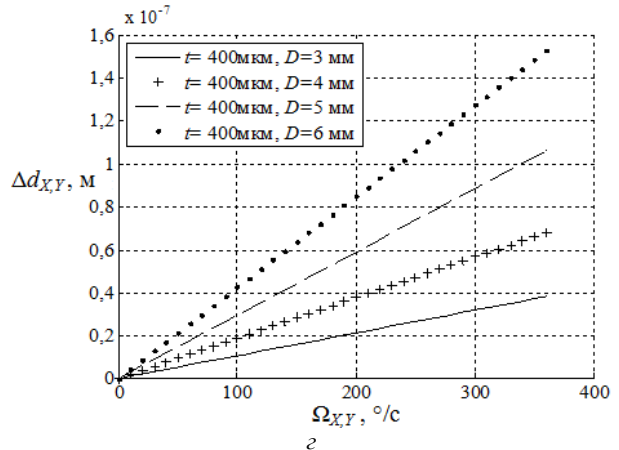
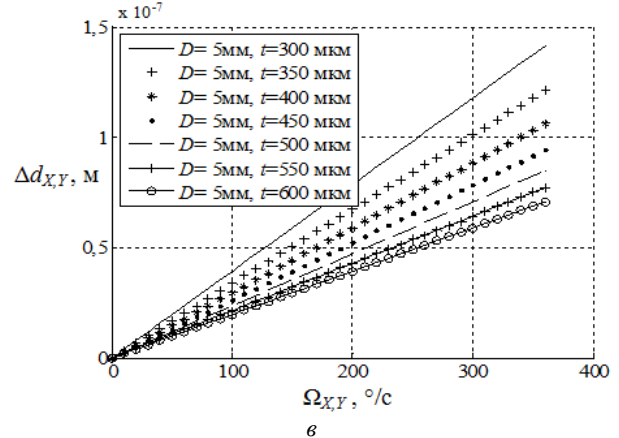


Рис. 7 (продолжение). Зависимость амплитуды вторых движений для  $\Omega_Z$  (а, б) для  $\Omega_X, \Omega_Y$  (в, г) от угловой скорости при изменении толщины и диаметра кольцевого резонатора

Зазор  $d(\Omega) = f(\Omega)$  между призмой и кольцевым резонатором определяется как:

$$d_{\text{мин } i}(\Omega) = d_{0i} - \Delta d_i(\Omega).$$

При увеличении угловых скоростей амплитуды изменений величины зазоров увеличиваются, в результате чего амплитуды изменений выходной оптической мощности также увеличиваются.

При этом следует учитывать, что при увеличении второго радиального движения кольцевого резонатора  $\Delta d(\Omega)$  происходит уменьшение зазора  $d_{\text{мин } i}(\Omega)$ , что приводит к уменьшению выходной оптической мощности. По амплитуде изменений выходной мощности можно измерять угловые скорости. На рис. 8 приведена зависимость изменения зазора от угловой скорости при изменении толщины резонатора  $h$  (рис. 8, а, б для  $\Omega_Z$  при  $d_{0Z} = 650$  нм) и диаметра  $D$  (рис. 8, в, г для  $\Omega_X$  и  $\Omega_Y$  при  $d_{0XY} = 250$  нм).

Изменения величины вторых движений происходят с постоянной частотой, равной собственной частоте колебания ( $f_1 = f_2 = 47$  кГц), и приведены на рис. 9. Под действием постоянной угловой скорости  $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z = 360^\circ/\text{с}$  изменение величины второго радиального движения составляет около 500 нм (для  $\Omega_Z$ ) и 170 нм (для  $\Omega_X$  и  $\Omega_Y$ ) при следующих параметрах резонатора: диаметр  $D = 6$  мм, первое движение  $A = 50$  мкм, толщина  $t = 400$  мкм и ширина  $h = 140$  мкм.

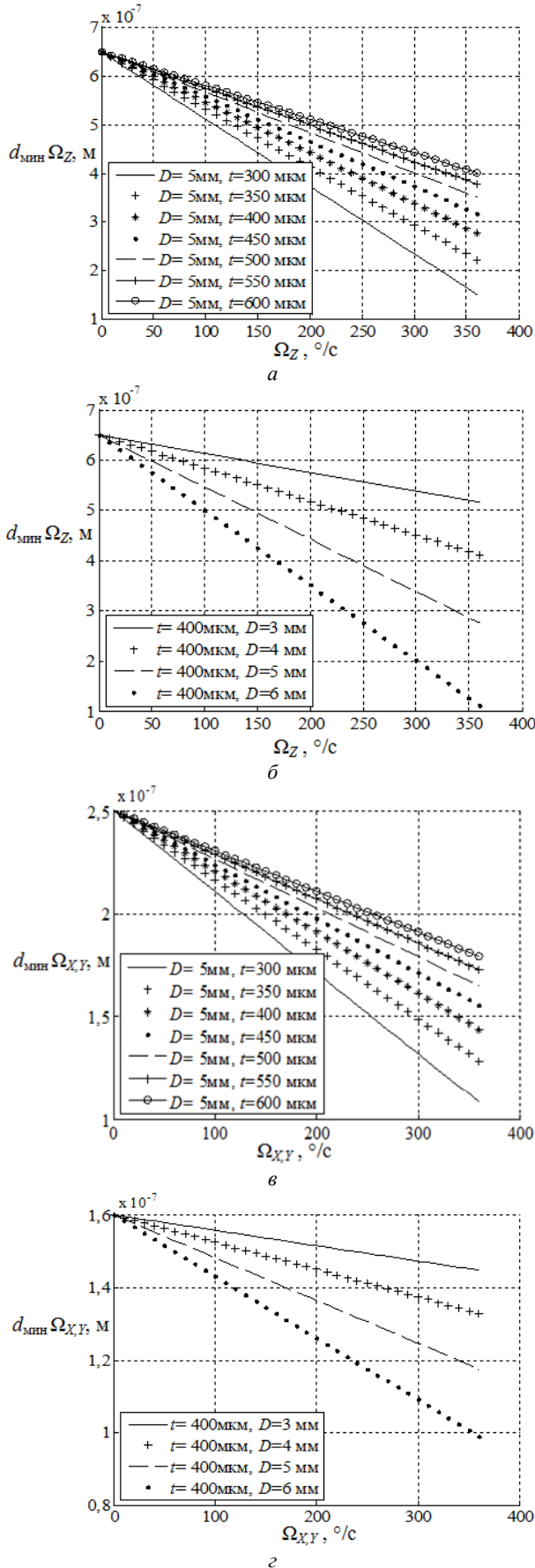


Рис. 8. Величины зазора измеряемых угловых скоростей  $\Omega_Z$  (а, б),  $\Omega_X$  и  $\Omega_Y$  (в, г) при изменении толщины кольцевого резонатора

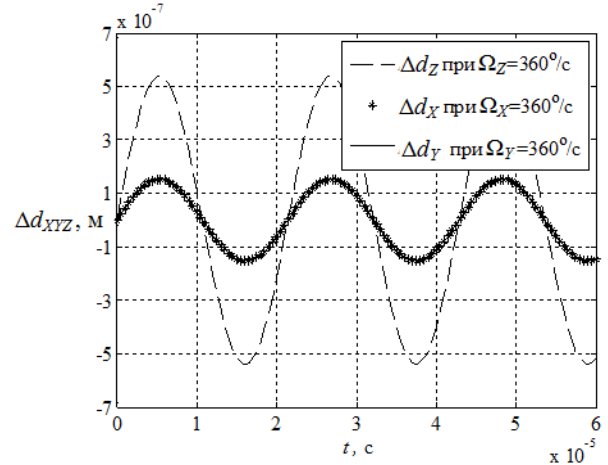


Рис. 9. Временная зависимость вторых движений при постоянных угловых скоростях

При выборе начального зазора  $d_{0Z} = 650$  нм и  $d_{0XY} = 250$  нм зазоры  $d_i(t)$  изменяются от 100 до 1200 нм (для  $\Omega_Z$ ) и от 100 до 400 нм (для  $\Omega_X$  и  $\Omega_Y$ ) (рис. 10), что соответствует диапазону измерения при использовании оптического туннельного эффекта.

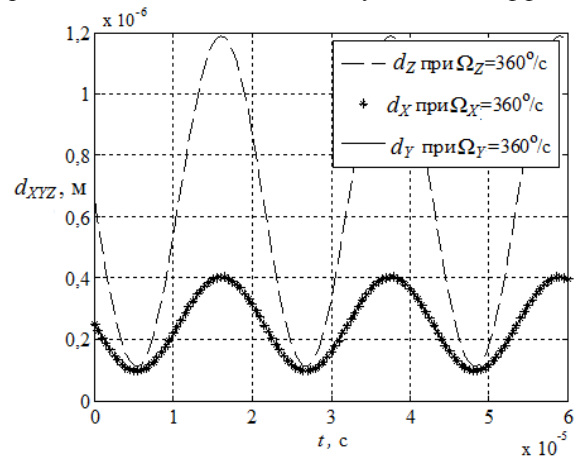


Рис. 10. Зависимость величины зазора от времени при постоянной угловой скорости

Таким образом, целесообразно выбирать радиус кольцевого резонатора  $r$  порядка единиц миллиметров при толщине  $t$  в сотни микрометров, что обеспечивает необходимую максимальную величину вторых движений и зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

### Функция преобразования трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Считывающие оптические узлы преобразователя угловой скорости представляют собой совокупность источников излучения, призм полного внутреннего отражения (с показателем преломления  $n_1$ ), кольцевого резонатора, фотоприемников. Изменение мощности выходного излучения каждого канала можно оценить по отражательной способности модулируемой границы сред  $R_{\min}(\Omega) = f[d_{\min}(\Omega)]$  [6, 7].

Поскольку воздействие угловых скоростей вызывает изменение расстояния между кольцевым резонатором и основанием призмы, функция преобра-



зования первичного преобразователя датчика угловой скорости (ДУС) определяется зависимостью мощности оптического излучения  $P_{ФП i} \{R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)]\}$ , достигающей фотоприемника, от зазора  $d$ . С учетом отражательной способности  $R$ , зависящей от зазора  $d$ , мощность оптического излучения на фотоприемнике определится как

$$P_{ФП i}(\Omega) = P_{ИИ} \cdot R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)] \cdot K_{потерь}$$

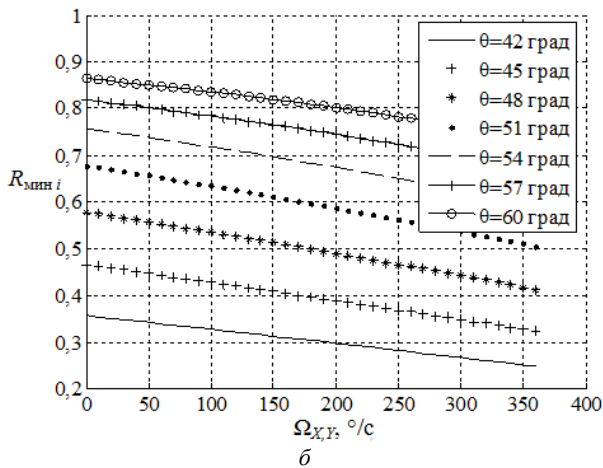
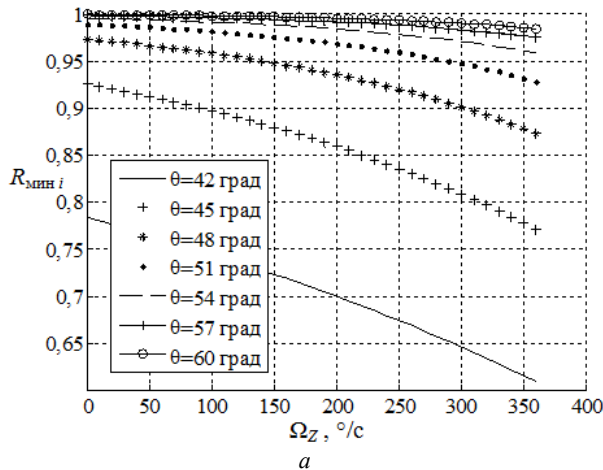


Рис. 11. Зависимость изменения значений отражательной способности для  $\Omega_Z$  (а) и для  $\Omega_X, \Omega_Y$  (б) от угловых скоростей при различных углах падения

Оптические мощности фотоприемников изменяются в противофазе (рис. 12) при следующих параметрах: мощность источника излучения  $P_{ИИ} = 2$  мВт, суммарный коэффициент потерь  $K_{потерь} = 0,5$  и действий постоянной угловой скорости  $\Omega_X = \Omega_Y = \Omega_Z = 360^\circ/\text{с}$ .

Функция преобразования одного узла считывания преобразователя угловой скорости определяется зависимостью выходного напряжения  $U_{ВЫХ i}(\Omega) = f(P_{ФП i} \{R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)]\})$  от угловой скорости. Выходное напряжение при использовании преобразователя «ток–напряжение» на основе операционного усилителя с сопротивлением в цепи обратной связи  $R_{ОС}$  с учетом тока фотоприемника определится как

$$U_{ВЫХ i}(\Omega) = R_{ОС} \cdot (S_{ФП} \cdot P_{ФП i} \{R_i [d_i(\Omega_{XYZ})]\} + I_T)$$

На рис. 13 изображена зависимость выходного напряжения преобразователя от угловых скоростей ( $\Omega_{XYZ}$ ).

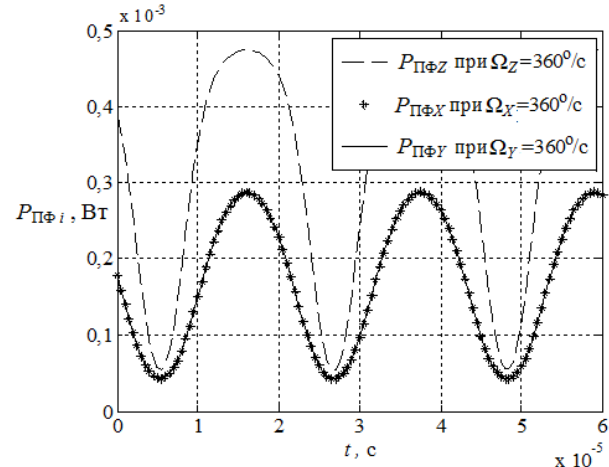


Рис. 12. Зависимость значений мощности фотоприемника от постоянных угловых скоростей

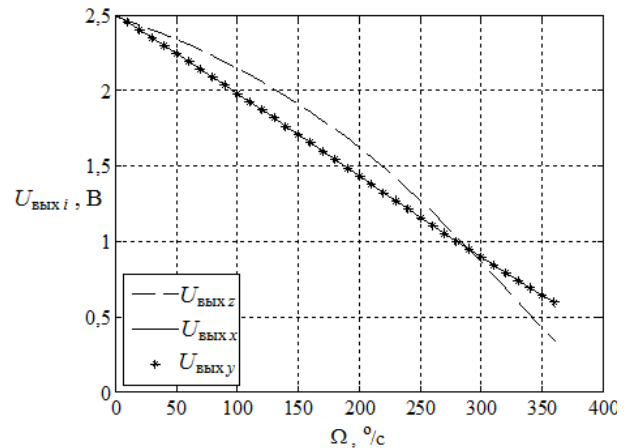


Рис. 13. Зависимость выходного напряжения  $i$ -го узла считывания преобразователя от угловых скоростей

Выходные напряжения преобразователя изменяются в противофазе (рис. 14) при следующих параметрах: сопротивление обратной связи  $R_{ОС Z} = 22$  кОм и  $R_{ОС X} = 10$  кОм, чувствительность фотоприемника  $S_{ФП} = 0,3$  и темновой ток  $I_T = 0,15$  нА.

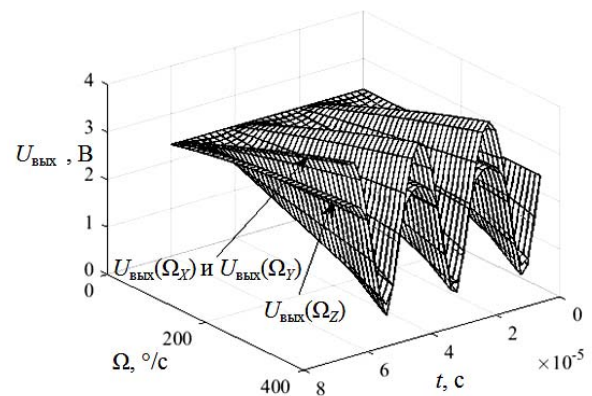


Рис. 14. Определение выходного напряжения  $i$ -го узла считывания преобразователя от угловых скоростей и времени

**Основные результаты**

Исследован трёхосевой волновой оптоэлектронный преобразователь угловой скорости, использующий один кольцевой резонатор. Получено соотношение между толщиной и высотой кольцевого резонатора, обеспечивающее измерение угловой скорости по трем осям с помощью одного кольцевого резонатора и оптического туннелирования.

Разработана функциональная схема преобразователя с шестью узлами считывания и исследовано влияние параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости. Предложена функция преобразования трёхосевого кольцевого преобразователя угловой скорости и получены зависимости оптической мощности фотоприемника, тока фотоприемника и выходного напряжения узлов считывания от угловой скорости.

Определены диапазоны параметров кольцевого резонатора (диаметр КР  $d = 3-6$  мм при толщине  $t = 300-600$  мкм), обеспечивающие при амплитуде первого движения  $A = 10-60$  мкм максимальную величину второго движения (до сотен нанометров), достаточную для обеспечения измерения угловых скоростей по трем осям в сотни градусов в секунду.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447).

**Литература**

1. Бусурин В.И. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости / В.И. Бусурин, В.В. Коробков, Ёин Наинг Вин // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 340–346.
2. Gallacher V.J. Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope / V.J. Gallacher, J.S. Burdess, A.J. Harris // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 1333–1343.
3. Матвеев В.А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 167 с.
4. Tom Irvine. Ring vibration modes revision D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/>. – January 26, 2015. – Р. 1–15.
5. Eley R. The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope/ R. Eley, C.H.J Fox, S. Mc. William // Journal

of Mechanical Engineering Science. – 2000. – Т. 214, № 12. – P. 1503–1513.

6. Бусурин В.И. Оптические и волоконно-оптические устройства и системы / В.И. Бусурин, А.В. Казарьян, Е.С. Неретин. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 112 с.

7. Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1986. – 854 p.

**Бусурин Владимир Игоревич**

Д-р техн. наук, профессор каф. 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета МАИ)  
Тел.: +7-916-918-82-26  
Эл. почта: vbusurin@mai.ru

**Коробков Вадим Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. 301  
Тел.: +7-916-102-23-44  
Эл. почта: vvkog@bk.ru

**Ёин Наинг Вин**

Аспирант каф. 301  
Тел.: +7-967-287-15-95  
Эл. почта: integratedchip.88@gmail.com

Busurin V.I., Korobkov V.V., Yin Naing Win.

**Investigation of the ring resonator parameters influence on the characteristics of the three-axis optoelectronic angular velocity transducer**

This article presents the structure and mathematical model of the three-axis photoelectric angular velocity transducer based on the optical tunneling effect (OTE) and then provides the transfer function of the three-axis optoelectronic angular velocity transducer. The influence of the ring resonator parameters to the natural frequency and the secondary displacement of the ring resonator is investigated. The influence of the optoelectronic module on the total internal reflectivity, the optical power of photo receiver and the output voltage is described also.

**Keywords:** Ring wave resonator, three axis optoelectronics transducer, angular velocity, optical tunneling, natural frequency of vibration, conversion function, gap, radial displacement.