

Анализ влияния дестабилизирующих факторов на характеристики преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта

**Бусурин В.И.^{1*}, Коробков В.В.², Казарьян А.В.³, Пашков С.П.⁴,
Наинг Ту Лвин¹**

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

*²Нижегородская инжиниринговая компания «Атомэнергопроект»,
Площадь Свободы, 3, Нижний Новгород, 603006, Россия*

*³Центральный научно-исследовательский технологический институт, ЦНИТИ
Техномаш, ул. Ивана Франко, 4, Москва, 121108, Россия*

*⁴Научно-производственное предприятие "Темп" им. Ф.Короткова, ул. Правды, 23,
Москва, 127015, Россия*

**e-mail: vbusurin@mai.ru*

Аннотация

Рассмотрено влияние дестабилизирующих факторов на характеристики четырехлучевого воспринимающего элемента и преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта; проведен анализ погрешностей такого преобразователя ускорения, показывающий возможность построения малогабаритного термостабильного устройства для систем управления и коррекции волновых гироскопов.

Ключевые слова: преобразователь, ускорения, четырехлучевой элемент, туннелирование, призма, температура, отражательная способность, поперечное ускорение, воздушное демпфирование.

Введение

Измерение ускорения в экстремальных условиях эксплуатации, в т. ч. высоких температур, сильных электромагнитных полей, агрессивных и взрывоопасных сред, характерных для объектов авиационной техники, может производиться с помощью кварцевого преобразователя ускорения (ПУ), реализованного на основе оптического туннельного эффекта, и связанного с ним четырехлучевого воспринимающего элемента (ВЭ).

Принцип действия ПУ основан на детектировании наноперемещений ВЭ под действием измеряемого параметра, в частности, ускорения. Исполнение элементов ПУ из кварца позволяет использовать устройство в экстремальных условиях эксплуатации [1,2].

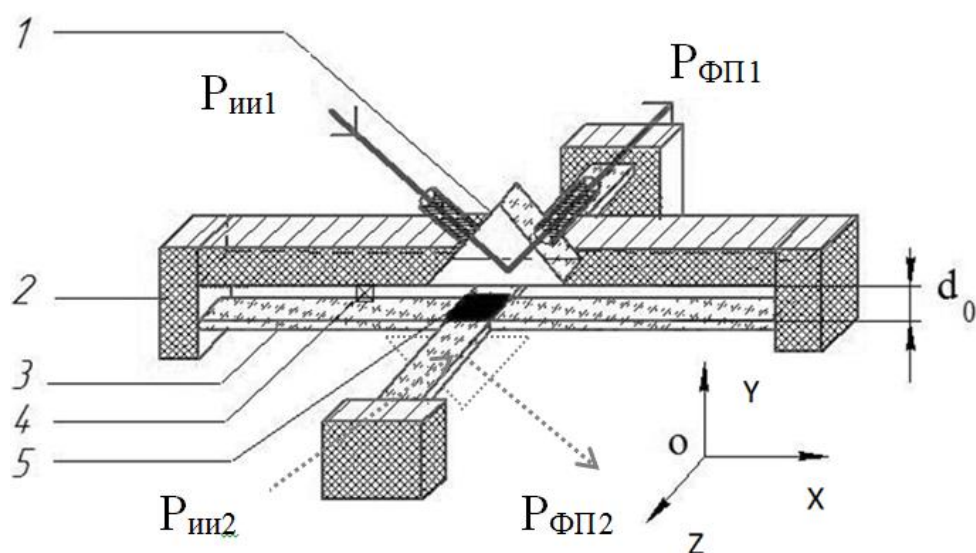
Для измерения ускорения преобразователь реализован на основе оптического туннельного эффекта в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина» [3]. Элементы ПУ изготовлены из плавленого кварца. Данный ПУ целесообразно использовать в тех случаях, когда определяющими являются малые размеры и малая масса, возможность интеграции в состав блоков волновых гироскопов и работы в агрессивных, взрывоопасных средах, широком диапазоне температур и резких ее колебаниях.

Структура и функция преобразования преобразователя ускорения

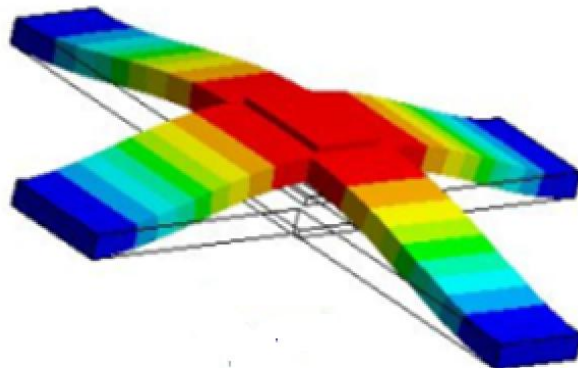
Функциональная схема предлагаемого ПУ на основе оптического туннельного эффекта и четырехлучевого ВЭ показаны на Рисунке 1.

Преобразователь ускорения состоит из источника излучения (ИИ) оптического диапазона и связанной с ним схемой возбуждения, призмы полного внутреннего отражения, ВЭ из оптического материала с дополнительной массой в центре, интегрированного с призмой, фотоприемника (ФП) с максимумом спектральной чувствительности в области спектра излучения ИИ и блока обработки (БО).

В качестве ВЭ для ПУ можно использовать однолучевой или многолучевой элементы. При выборе конструкции ВЭ необходимо учитывать ограничения на размеры, а также подверженность влиянию поперечных ускорений. призму (1), прокладку (2), ВЭ (3), воздушный зазор (4), дополнительную массу (5).



(a)



(б)

Рис.1 Функциональная схема ПУ на основе оптического туннельного эффекта

(а) и конструкция четырехлучевого ВЭ (б)

Величина прогиба четырехлучевого элемента $w_4(a_y)$ под действием ускорения a_y зависит от длины l , толщины h , ширины b лучей, модуля упругости E , плотности материала ρ , дополнительной массы m_{don} и определяется выражением [4]:

$$w_4(a_y) = \frac{12 \cdot \rho \cdot a_y \cdot l^4}{1136 \cdot E \cdot h^2} + \frac{12 \cdot m_{don} \cdot a_y \cdot l^3}{768 \cdot E \cdot b \cdot h^3}.$$

При использовании в составе ПУ четырехлучевого ВЭ с дополнительной массой $m_{don} = 0,45$ мг, длиной лучей $l = 5$ мм, шириной лучей $b = 0,5$ мм, толщиной лучей $h = 0,2$ мм получены следующие результаты.

Под действием ускорения 10 g, при равных поперечных размерах и длинах лучей четырехлучевого ВЭ, его максимальный прогиб составит 0,21 мкм. Данная деформация детектируется на основе оптического туннельного эффекта.

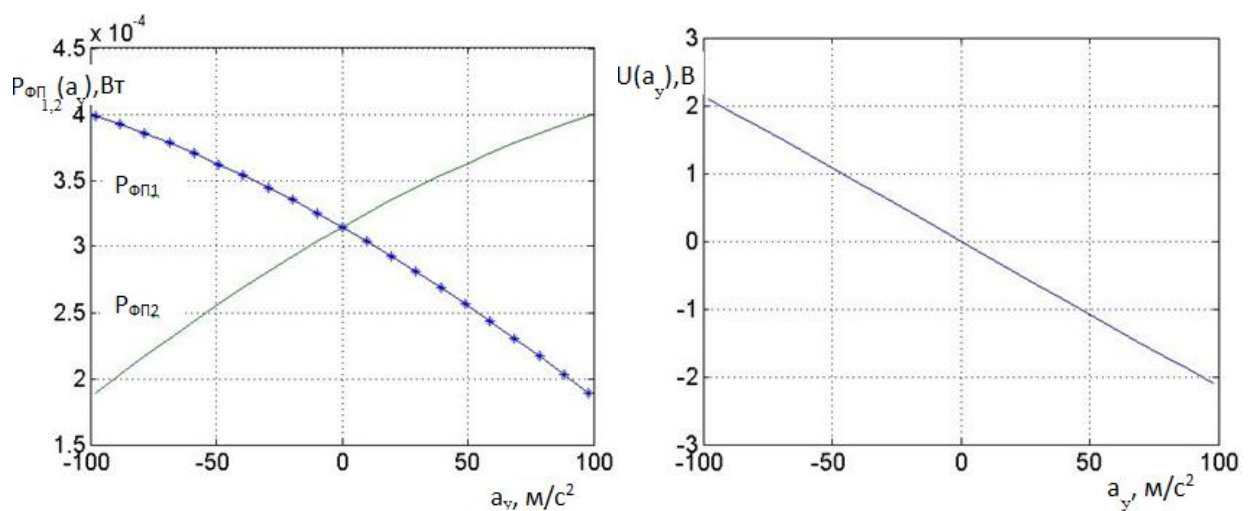
Величина зазора между призмой и ВЭ $d(a_y)$ зависит от перемещения центральной части ВЭ и определяется с учетом начального зазора d_0 : $d(a_y) = d_0 \pm w_4(a_y)$. Предполагается, что величина зазора между центральной частью ВЭ и

призмой постоянно вдоль модулируемой грани призмы за счет размещения в центре ВЭ недеформируемого элемента с дополнительной массой $m_{дон}$.

Для улучшения линейности функции преобразования ПУ предлагается использование двух независимых каналов детектирования выходных оптических сигналов с применением дополнительной призмы, расположенной симметрично относительно центральной части ВЭ.

На Рисунке 2 приведены зависимости изменения выходных мощностей $P_{ФП1,2}(a_y)=f[R[\pm d(a_y)]]$ (а) и выходного напряжения $U(a_y) = [I_T + S \cdot P_{ФП}(R[\pm d(a_y)])] \cdot R_U$ (б) от ускорения при следующих параметрах ПУ: начальный зазор $d_0 = 0,5$ мкм, показатель преломления призмы $n_1 = 1,46$; показатель преломления ВЭ; $n_3 = 1,46$; разделительная среда – воздух ($n_2 \approx 1$); длина волны $\lambda = 1,3$ мкм; угол падения $\theta = 49^\circ$ от ускорения. Для двухканального преобразователя определены зависимости изменения выходной напряжения $U(a) = k \cdot \frac{U_1(a_y) - U_2(a_y)}{U_1(a_y) + U_2(a_y)}$, k - коэффициент обработки,

от ускорения при выше перечисленных конструктивных параметрах (рис. 2)..



а)

б)

Рис. 2. Зависимость выходной мощности (а) и выходного напряжения (б) от ускорения

Из приведенных зависимостей видно, что исследуемая модель ПУ обладает функцией преобразования, близкой к линейной в диапазоне изменения ускорения $\pm 10g$.

Увеличение начального зазора d_0 приводит к увеличению выходной оптической мощности, регистрируемой фотоприемником. Исследование влияния отклонения угла падения оптического излучения θ источника излучения на выходной сигнал показывает, что изменение величины угла падения от номинального значения на $\pm 0,002$ рад приводит к погрешности ПУ порядка $\pm 0,7\%$ при диапазоне измерения ускорения.

Анализ дополнительной температурной погрешности ПУ

При изменении температуры в ПУ возникает изменение величины зазора d между призмой и центральной частью четырехлучевого ВЭ из-за температурного расширения материала прокладки, изменение величины прогиба четырехлучевого ВЭ за счет изменения модуля упругости материала, из которого изготовлен ВЭ (в нашем случае - плавленый кварц).

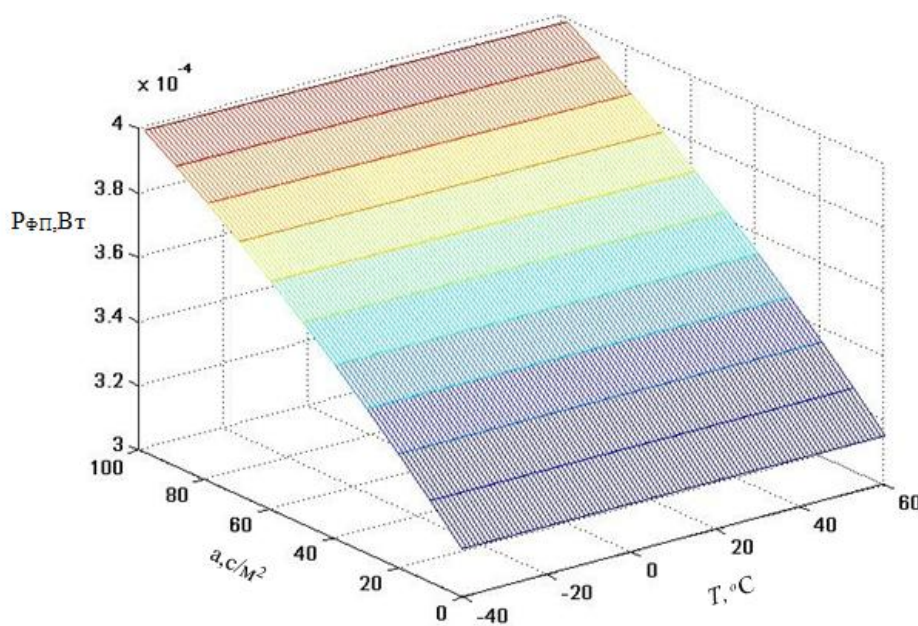
Модуль упругости материала $E(T)$ как функция воздействия температуры T определяется следующим выражением:

$$E(T) = E_0 + \beta(T - T_0),$$

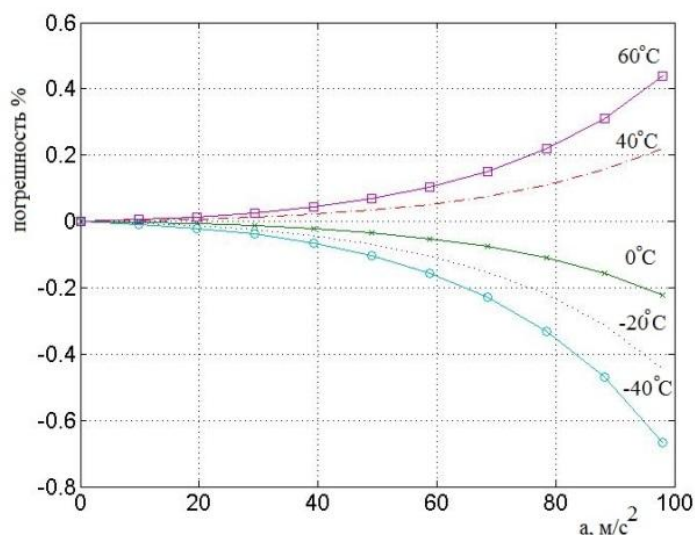
где E_0 - модуль упругости при температуре $T_0=20^\circ\text{C}$; β - температурный коэффициент модуля упругости.

При воздействии температуры максимальное температурное изменение выходной оптической мощности 2,5мкВт наблюдается при максимальном ускорении. На Рисунке 3 представлены зависимости выходной оптической мощности от ускорения при разных температурах (а) погрешности ПУ от ускорения (в).

При $T = -40^\circ\text{C}$ величина дополнительной температурной погрешности составит 0,68 %, а при $T = +60^\circ\text{C}$ дополнительная температурная погрешность составит 0,45 % при ускорении, равном 10 g.



а)



б)

Рис. 3 Зависимости выходной оптической мощности от ускорения при разных температурах T_{var} (а) и величины погрешности ПУ от ускорения (б).

Из данных результатов видно, что температура оказывает слабое влияние на выходной сигнал ПУ.

Анализ влияния поперечного ускорения

Ускорение, направленное вдоль оси OY , является измеряемым, а ускорения, направленные вдоль осей OX и OZ , являются поперечными. Под действием ускорения, направленного вдоль оси OX , продольная часть четырехлучевого ВЭ растягивается (сжимается), а поперечная часть элемента -изгибается. На Рисунке 4 показано влияние поперечного ускорения на четырехлучевой ВЭ.

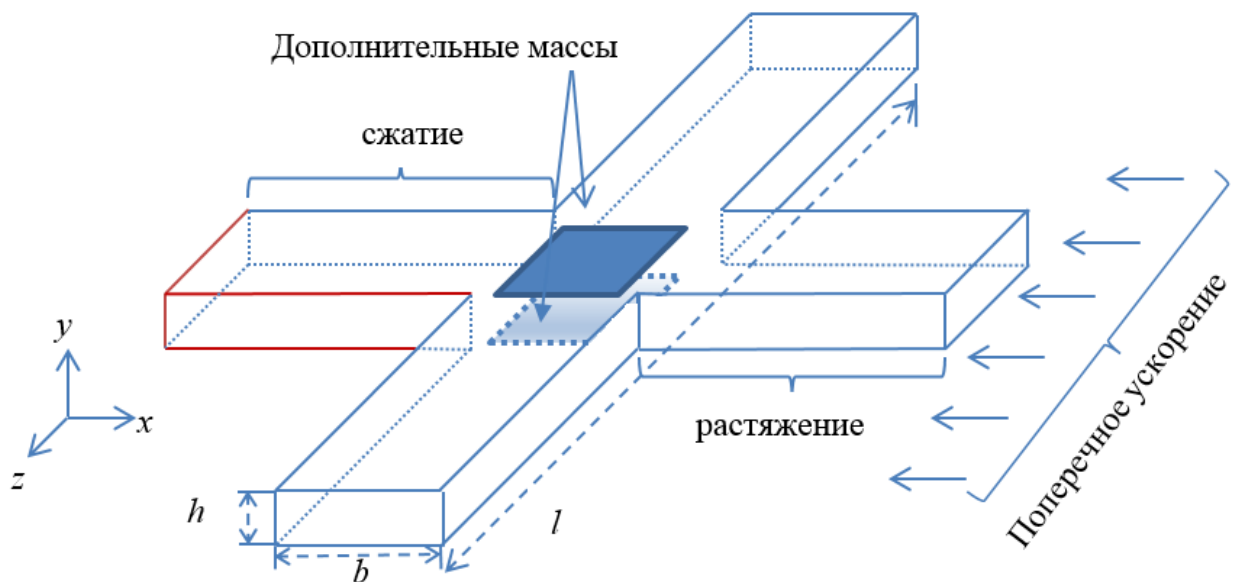


Рис. 4 Влияние поперечного ускорения на четырехлучевой ВЭ

Изгиб поперечной части четырехлучевого элемента под действием ускорения

a_x определяется как[5]:

$$w(a_x) = \frac{12 \cdot a_x \cdot l^3}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(\frac{m_6 + 2 \cdot m_{дон}}{384} \right)$$

где m_6 —масса поперечной части четырехлучевого элемента, а возникающая сила сжатия будет иметь вид:

$$F_{сжатие}(a_x) = w(a_x) \cdot \frac{32 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{l^3}$$

Сила сжатия и сила растяжения действуют на поперечную часть четырехлучевого элемента под действием ускорения a_x , поэтому сила сжатия

$$F_{сжатие}(a_x) = F(a_x)/2.$$

На Рисунке 5 приведена зависимость силы сжатия $F_{сжатие}(a_x)$ от изгиба поперечной части элемента под действием ускорения, направленного по оси Ox .

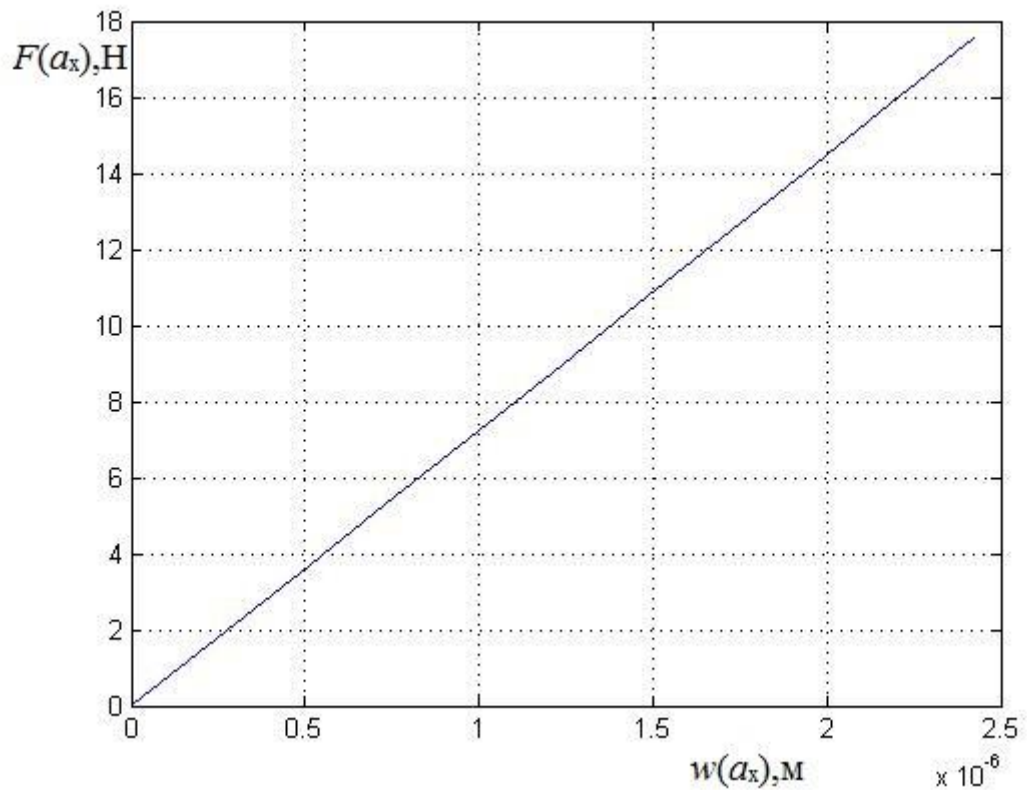


Рис. 5 Зависимость силы сжатия от изгиба поперечной части элемента под действием ускорения, направленного по оси OX

Изгиб луча четырехлучевого элемента не происходит, если сила Эйлера больше чем максимальная сила, вызванная действием поперечного ускорения на ВЭ.

Величина силы Эйлера определяется следующей зависимостью[4]:

$$P_{кр} = \frac{c \cdot \pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2},$$

где c – коэффициент края, зависит от граничного условия, $c=2$; E – модуль Юнга; J – момент инерции; l – длина луча; $P_{кр} > F(a_x)_{\text{макс}}$.

Значение нагрузки критического прогиба зависит от длины, ширины и толщины луча, модуля упругости четырехлучевого ВЭ. Для рассматриваемой

механической системы ПУ сила Эйлера больше, чем сила изгиба, поэтому поперечные ускорения не влияют на характеристики ПУ.

Исследование газового демпфирования ПУ на основе оптического туннельного эффекта

Демпфирование микрооптоэлектромеханического преобразователя ускорения в присутствии газа, захваченного в узком зазоре преобладает разрушение масляной плёнки, и позволяют регистрировать изменение выходного оптического сигнала при изменении малого зазора между оптическими элементами преобразователя. Газ в нанозазоре между ВЭ и призмой влияет на систему двумя различными способами. Газ может быть сжимать из-за перемещения ВЭ преобразователя и проводит силу упругости, противодействующие движению ВЭ. Газ также течет в зазор при рассеянии движения ВЭ позволяют регистрировать изменение выходного оптического сигнала при изменении малого зазора между оптическими элементами преобразователя. Таким образом газовое демпфирование проводит изменение выходного оптического сигнала при изменении малого зазора между оптическими элементами преобразователя.

Эффект газового демпфирования ПУ на основе оптического туннельного эффекта показан на Рисунке 6.

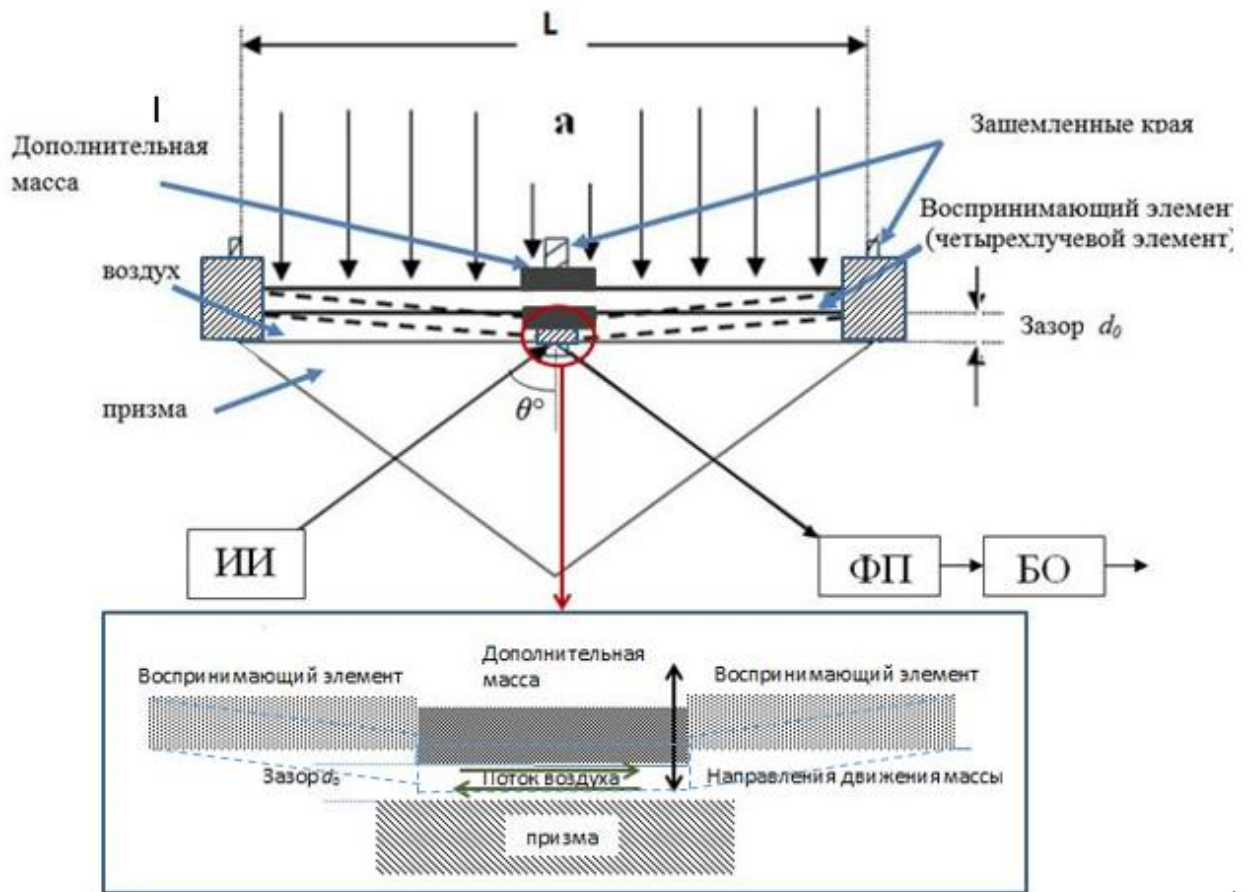


Рис. 6 Газового демпфирования ПУ на основе оптического туннельного эффекта

Перемещение ВЭ под действием ускорения будет сжимать значительный объем воздуха в очень узкий зазор. Вязкость и инерция воздуха препятствуют протеканию воздушного потока вдоль зазора. По этой причине сила давления в зазоре увеличивается, возникает эффект газового демпфирования.

Для рассматриваемой конструкции воспринимающего элемента число Кнудсена составляет 0,08 и реализуется режим скольжения потока [6]:

$$K_n \approx \frac{l_m}{h_0} ,$$

где l_m - длина свободного пробега воздуха (l_m (мкм) = 0.069/P);

h_0 - начальный зазор ($h_0 = 0.9$ мкм);

p - давление окружающей среды.

Сила сопротивления определяется по формуле[7]:

$$F_{\text{сопротивление}} = \frac{64 \cdot \sigma}{\pi^6} \sum_{\substack{m,n \\ \text{odd}}} \frac{m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2}{(m \cdot n)^2 \left[\left\{ m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2 \right\}^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right]},$$

а сила упругости определится как [7]:

$$F_{\text{упругости}} = \frac{64 \cdot \sigma}{\pi^6} \sum_{\substack{m,n \\ \text{odd}}} \frac{1}{(m \cdot n)^2 \left[\left\{ m^2 + \left(\frac{n}{\beta}\right)^2 \right\}^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right]},$$

где σ - число сжатия,

$$\sigma = \frac{12 \cdot \mu^* \cdot \omega \cdot b^2}{d_0^2 \cdot P_a},$$

μ^* - эффективная вязкость воздуха при комнатной температуре;

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + 6 \cdot Kn};$$

μ - динамическая вязкость воздуха;

ω - собственная частота ВЭ;

b - ширина луча воспринимающего элемента.

Число сжатия является главным параметром, который определяет силу сопротивления и упругости газа в зазоре. Величина эффективной вязкости воздуха оказывает сильное влияние на число сжатия и зависит от режима потока.

На Рисунке 7 приведена зависимость силы сопротивления и упругости от числа сжатия.

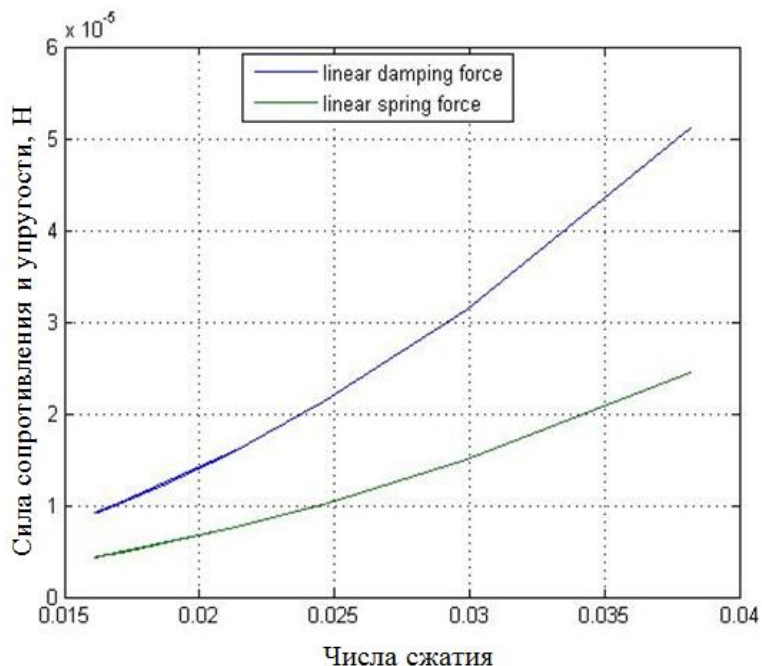


Рис.7 Зависимость силы сопротивления и упругости от числа сжатия

Влияние газового демпфирования сводится к возникновению дополнительной силы упругости и силы сопротивления. Для рассмотренного преобразователя их величины не превосходят 0,25 мкН и 0,5 мкН соответственно, что на несколько порядков меньше по сравнению с силой упругости воспринимающего элемента.

Заключение

Под действием ускорения 10 g, при одинаковых поперечных размерах и длинах лучей четырехлучевого ВЭ, его максимальный прогиб составит 0,21 мкм. Данная деформация эффективно детектируется на основе оптического туннельного эффекта.

Определены зависимости выходной оптической мощности и выходного напряжения ПУ от ускорения. Показано, что исследуемая модель ПУ обладает функцией преобразования, близкой к линейной во всем диапазоне измерения ускорения.

Исследовано влияние дестабилизирующих факторов на точностные характеристики ПУ. Показано, что при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$ погрешность ПУ составляет менее 0,7% во всем диапазоне измерения ускорения. Показано, что предлагаемая реализация ПУ слабо подвержена влиянию поперечного ускорения, так как максимальная боковая сила значительно меньше, чем критическая сила Эйлера (в диапазоне поперечных ускорений от $-10g$ до $+10g$).

Исследование газового демпфирования показало, что для рассматриваемой конструкции ВЭ число Кнудсена составляет 0.08 и реализуется режим течения со скольжением потока. Влияние газового демпфирования сводится к возникновению дополнительной силы упругости и силы сопротивления. Для рассмотренного преобразователя их величины не превосходят 0,25 мкН и 0,5 мкН соответственно, что на несколько порядков меньше по сравнению с силой упругости воспринимающего элемента.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ

(грант №16-08-00447).

Библиографический список

1. Косцов Э.Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики // Автометрия. 2009. №3. С. 3 - 52.
2. Удалов А.Ю., Назарова И.Т. Исследование дифференциального волоконно-оптического преобразователя угловых перемещений с помощью оптического тестера // Труды МАИ, 2012, № 51: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29193>
3. Fraden J. Handbook of modern sensors. Physics designs and applications, 3rd edition, Springer-Verlag, New York, 2004, 579p.
4. Бусурин В.И., Наинг Ту Лвин., Бердюгин Н.А., Ахламов П.С. Исследование преобразователя ускорения на основе оптического туннельного // Труды МАИ, 2014, № 72: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47353>
5. Madhukar V. Mechanics of Material, second edition, Michigan Technological University, 2014, 578p.
6. Vemuri S., Fedder G.K. and Mukherjee T. “Low ordersqueeze film model for simulation of MEMS devices”, in Proc. MSM’00, 2000, 205-208p.
7. Mol L., Rocha L.A, Cretu E., Wolffenbuttel R.F. Squeeze film damping measurements on a parallel-plate MEMS in the free molecular regime, Journal of micromechanics and microengineering, 19-2009, 6p.