

РАСЧЕТ БАЛОЧНОГО МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

В.И. Бусурин

Н.А. Макаренкова

Зо Лвин Хту

vbusurin@mai.ru

n.a.makarenkova@yandex.ru

zawlwinhtoo57@gmail.com

МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена функциональная схема преобразователя линейного ускорения с модулятором на основе оптического туннельного эффекта для съема информации о нанометровых перемещениях балочно-го чувствительного элемента, возникающих под действием линейных ускорений. Приведен набор параметров оптического модулятора микроопто-электромеханического преобразователя для измерения линейных ускорений в заданном диапазоне с заданной погрешностью нелинейности функции преобразования. Определена зависимость погрешности нелинейности функции преобразования от диапазона изменения чувствительности оптического модулятора на основе оптического туннельного эффекта при различных длинах волн. Диапазон перемещения чувствительного элемента вычислен по допустимому изменению чувствительности оптического модулятора, зависящей от значения параметра m , найденного с заданной погрешностью нелинейности функции преобразования. Предложен алгоритм расчета балочного микрооптоэлектромеханического преобразователя линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта, использующий математическую модель преобразователя линейного ускорения и позволяющий по набору исходных данных определить параметры оптической, механической и электронной частей преобразователя. Разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм расчета конструктивных параметров балочного микрооптоэлектромеханического преобразователя линейного ускорения

Ключевые слова

Микрооптоэлектромеханический преобразователь, линейное ускорение, оптический модулятор, оптический туннельный эффект, чувствительность, погрешность нелинейности, алгоритм расчета

Поступила 26.01.2024

Принята 01.03.2024

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 23-29-00954, <https://rscf.ru/project/23-29-00954>)

Введение. В настоящее время микроэлектромеханические (МЭМ) акселерометры широко используются во многих приложениях мобильных устройств, смартфонов, систем управления и контроля автомобилей, летательных аппаратов, роботов технических устройств, манипуляторов благодаря их небольшим размерам, малой массе, низкой стоимости, малому энергопотреблению и высокой надежности [1–7]. В МЭМ-акселерометрах действующее ускорение можно измерить емкостными, электромагнитными, пьезоэлектрическими, пьезорезистивными и оптическими методами [8–11]. Микрооптоэлектромеханические (МОЭМ) акселерометры имеют ряд преимуществ, включая устойчивость к электромагнитным помехам и высокую чувствительность [12, 13]. Использование оптических методов обеспечивает возможность измерения нанометровых перемещений чувствительного элемента (ЧЭ), вызванных ускорением [14, 15]. В МОЭМ-структуре имеют место три стадии преобразования: механическая, оптическая и электронная. Под действием линейного ускорения ЧЭ механически перемещается в субмикрометровом диапазоне. Перемещение ЧЭ считывается оптическим узлом, который передает информацию в электрическую часть, формирующую выходное напряжение, пропорциональное линейному ускорению [16–19]. Здесь рассмотрен расчет МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с механическим ЧЭ балочного типа и узлом считывания оптической информации на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) по сформированному набору исходных данных. Предметом исследования является расчет геометрических, оптических и электрических параметров балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ, исходными данными — диапазон измеряемых линейных ускорений $\pm a_{\text{макс}}$, погрешность нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования оптического модулятора и диапазон выходных напряжений $\pm U_{\text{вых_макс}}$.

Цель настоящей работы — определение набора параметров МОЭМ-преобразователя линейного ускорения: длины волны λ источника излучения (ИИ), угла падения θ излучения, диапазона перемещения $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ, начального зазора d_0 , длины L и толщины h ЧЭ, ширины ЧЭ w для измерения линейных ускорений в заданном диапазоне $\pm a_{\text{макс}}$ с заданной погрешностью нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования.

Точность МОЭМ-преобразователя линейного ускорения оценивается по погрешности нелинейности функции преобразования.

Выбор оптических параметров оптического модулятора балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ. Рассматриваемый оптический модулятор состоит из части балочного ЧЭ с нане-

сенным слоем с поглощающим покрытием, призмы полного внутреннего отражения (ПВО), отражающая грань которой расположена на расстоянии d_0 от слоя с поглощающим покрытием, ИИ и фотоприемника (ФП), соединенных по оптическому лучу. Под действием линейного ускорения возникает распределенная сила q , под влиянием которой происходит перемещение свободного края ЧЭ, что изменяет рабочий зазор d и связанные с ним выходную оптическую мощность и ток ФП, поступающий на вход блока обработки (БО) (рис. 1).

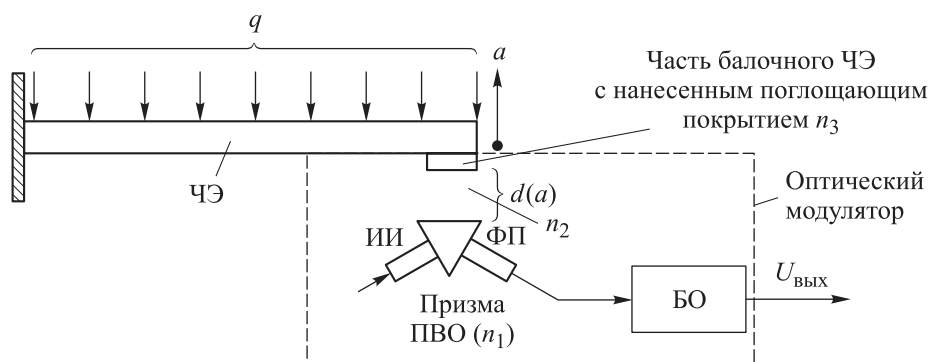


Рис. 1. Функциональная схема балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ

В качестве ИИ могут быть использованы лазерные светодиоды, работающие в диапазоне длин волн оптического излучения от 0,63 до 1,55 мкм. Длина волны λ ИИ влияет на отражательную способность R оптического модулятора на основе ОТЭ. Для обеспечения большого диапазона рабочих зазоров необходимо использовать большую длину волны λ .

Показатели преломления сред необходимо выбирать так, чтобы значения показателей n_3 преломления слоя с поглощающим покрытием и n_1 призмы ПВО были больше значения показателя n_2 преломления среды, находящейся между ЧЭ и призмой ПВО.

Угол падения θ излучения на модулируемую грань призмы ПВО оптического модулятора на основе ОТЭ выбирается так, чтобы не нарушались условия ПВО.

Фотоприемник выбирается из условия спектральной совместимости с характеристиками ИИ. В связи с этим целесообразно использовать германиевые ФП в МОЭМ-преобразователях линейного ускорения на основе ОТЭ для детектирования ИК-излучения.

При субмикронных перемещениях ЧЭ, вызванных действием линейного ускорения, происходит изменение рабочего зазора d между ЧЭ

и призмой ПВО. Функция преобразования оптического модулятора определяется отражательной способностью R модулируемой границы призмы ПВО, зависящей от значения переменного рабочего зазора d [20]:

$$R(d(a)) = \frac{\exp(-a_1\sqrt{b}) + \exp(a_1\sqrt{b}) + 2\cos(\varphi_{12\perp} - \varphi_{23\perp})}{2[\exp(-a_1\sqrt{b}) + \exp(a_1\sqrt{b}) + 2\cos(\varphi_{12\perp} + \varphi_{23\perp})]} + \frac{\exp(-a_1\sqrt{b}) + \exp(a_1\sqrt{b}) + 2\cos(\varphi_{12} - \varphi_{23})}{2[\exp(-a_1\sqrt{b}) + \exp(a_1\sqrt{b}) + 2\cos(\varphi_{12} + \varphi_{23})]}, \quad (1)$$

где $d(a)$ — рабочий зазор между ЧЭ и призмой ПВО;

$$a_1 = \frac{4\pi d(a)}{\lambda}; \quad b = n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2;$$

$$\varphi_{12\perp} = \arctg\left(\frac{2n_1 \cos \theta \sqrt{b}}{n_1^2 \cos^2 \theta - b}\right); \quad \varphi_{23\perp} = 180^\circ + \arctg\left(\frac{2n_1 \cos \theta \sqrt{b}}{n_1^2 \cos^2 \theta - b}\right);$$

$$\varphi_{12} = \arctg\left(\frac{2n_1 \cos \theta \sqrt{b}}{n_2^2 \cos^2 \theta - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 b}\right); \quad \varphi_{23} = 180^\circ + \arctg\left(\frac{2n_1 \cos \theta \sqrt{b}}{n_2^2 \cos^2 \theta - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 b}\right).$$

Для определения квазилинейного участка функции преобразования оптического модулятора на основе ОТЭ можно использовать зависимость чувствительности S от рабочего зазора d ($S = \partial R / \partial d$). Увеличение длины волны λ ИИ вызывает расширение диапазона рабочих зазоров и уменьшает уровень максимальной чувствительности $S_{\text{макс}}$. При расширении диапазона рабочих зазоров обеспечивается диапазон измерения больших линейных ускорений.

Определение зависимости погрешности нелинейности оптического модулятора на основе ОТЭ от диапазона изменения рабочего зазора. Диапазон изменения чувствительности S функции преобразования оптического модулятора на основе ОТЭ можно выбрать по значению параметра $m = S_{\text{макс}} / S$ (коэффициента допустимого уменьшения чувствительности от максимального значения $S_{\text{макс}}$) и увеличить при увеличении параметра m (рис. 2).

При выборе значения параметра m определяются минимальный $d_{\text{мин}}$ и максимальный $d_{\text{макс}}$ рабочие зазоры, а также диапазон перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ оптического модулятора на основе ОТЭ:

$$2\Delta d_{\text{макс}} = d_{\text{макс}} - d_{\text{мин}}, \quad (2)$$

где $\Delta d_{\text{макс}}$ — максимальное изменение рабочего зазора относительно начального зазора d_0 .

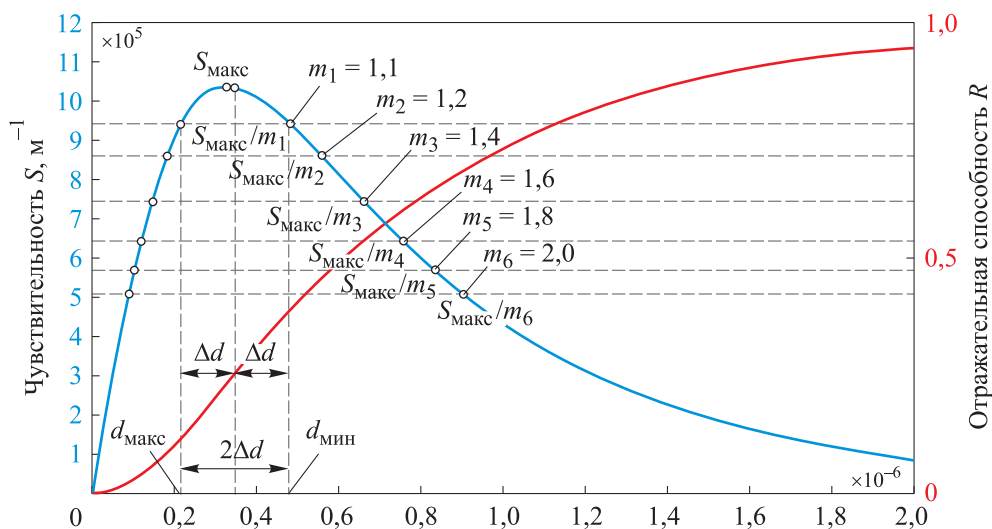


Рис. 2. Определение диапазона изменения рабочих зазоров в зависимости от значения параметра m

Чем больше диапазон изменения чувствительности S оптического модулятора, тем больше диапазон перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ и погрешность нелинейности $\delta_{\text{нел}}$.

Для организации съема информации о линейных ускорениях оптическим модулятором на основе ОТЭ необходимо задать начальный зазор d_0 между ЧЭ и призмой ПВО:

$$d_0 = \frac{d_{\text{макс}} + d_{\text{мин}}}{2}. \quad (3)$$

Выбор значения параметра m определяет начальный зазор d_0 и диапазон перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ. Увеличение значения параметра m приводит к уменьшению минимального зазора $d_{\text{мин}}$, увеличению максимального зазора $d_{\text{макс}}$ и расширению диапазона перемещений ЧЭ $2\Delta d_{\text{макс}}$, что обеспечивает больший диапазон измерения линейных ускорений (рис. 3).

При увеличении значения параметра m , расширяющего диапазон перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ, происходит расширение участка линии отражательной способности R функции преобразования, который аппроксимируется прямой линией, что приводит к увеличению погрешности нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования.

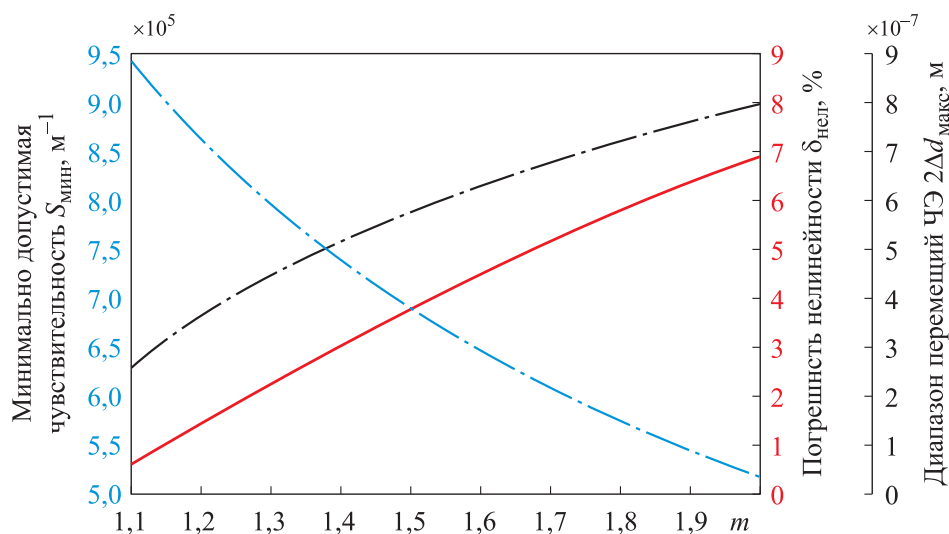


Рис. 3. Зависимости минимальной чувствительности, диапазона перемещений ЧЭ и погрешности нелинейности от значения параметра m

В расчете балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ конструктивные параметры ЧЭ определяются по значениям начального зазора d_0 и диапазона перемещений ЧЭ $2\Delta d_{\max}$, зависящих от погрешности нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования оптического модулятора на основе ОТЭ.

Алгоритм расчета балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ. Предложен алгоритм расчета балочного МОЭМ-преобразователя, обеспечивающий по сформированному набору исходных данных определение конструктивных (геометрических, оптических и электрических) параметров балочного МОЭМ-преобразователя для измерения линейного ускорения в заданном диапазоне (рис. 4).

Конструктивные параметры преобразователя рассчитываются по исходным данным: диапазону измеряемых линейных ускорений $\pm a_{\max}$, погрешности нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования оптического модулятора, диапазону выходных напряжений $\pm U_{\text{вых_макс}}$.

Предположим, что погрешность нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ определяется в основном нелинейностью оптического модулятора. Сначала выбираются оптические параметры оптического модулятора, к которым относятся длина волны λ ИИ, спектральная чувствительность ФП $S_{\text{ФП}\lambda}$, показатель преломления призмы ПВО n_1 . Используя эти параметры, рассчитывают угол падения θ излучения на гипотенузную грань призмы для выпол-

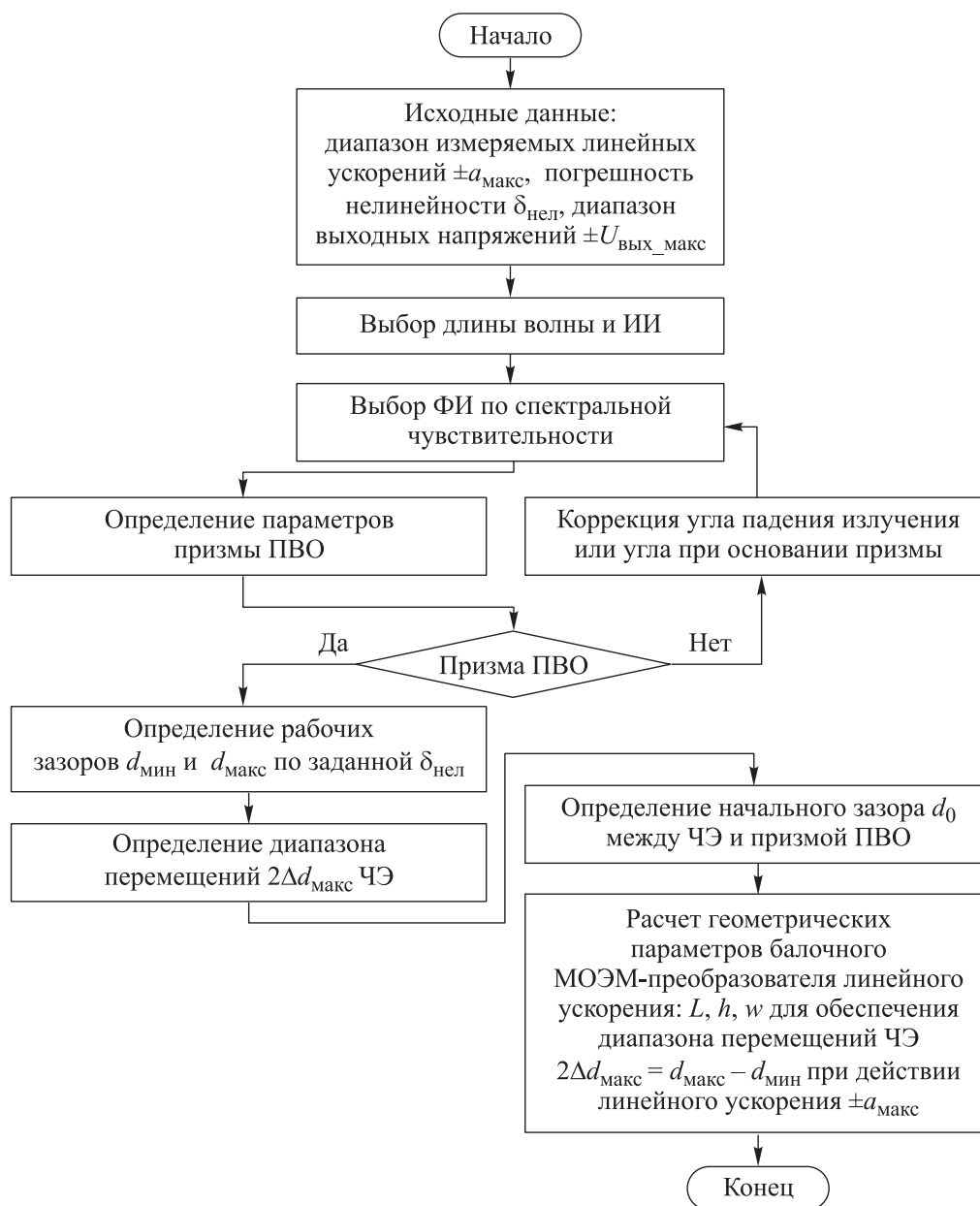


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ

нения условия ПВО. Принимая, что шероховатость рабочих граней призмы равна 0,05 мкм, рассчитывают отражательную способность R в зависимости от изменения рабочего зазора d между ЧЭ и призмой ПВО.

Диапазон изменения чувствительности S отражательной способности соответствует значению параметра m и связан с погрешностью нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования. По заданной нелинейности функции преобразования определяются минимальный $d_{\text{мин}}$ и максимальный $d_{\text{макс}}$ рабочие зазоры, а также диапазон перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ. Затем определяется начальный зазор d_0 между ЧЭ и призмой ПВО как середина диапазона перемещений $2\Delta d_{\text{макс}}$ ЧЭ.

Конструктивные параметры балочного ЧЭ МОЭМ-преобразователя линейного ускорения определяются с учетом заданного диапазона измерения максимального линейного ускорения $\pm a_{\text{макс}}$, рассчитанного начального зазора d_0 и максимального изменения рабочего зазора $\Delta d_{\text{макс}}$.

Рабочий зазор d зависит от значения линейного ускорения a и его изменения не должны превышать значения $\Delta d_{\text{макс}}$ при ускорении $a_{\text{макс}}$:

$$d_{\text{мин}} \leq \{d_0 - \Delta d_{\text{макс}}(a)\} \leq d_{\text{макс}}. \quad (4)$$

Значение максимального изменения рабочего зазора $\Delta d_{\text{макс}}$ также зависит от геометрических параметров ЧЭ [21] и с учетом заданного значения длины L толщина h определяется по формуле:

$$h = L^2 \left(\frac{3}{2} \frac{\rho}{E \Delta d_{\text{макс}}} a_{\text{макс}} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь E — модуль упругости ЧЭ; ρ — плотность ЧЭ.

Ширина w ЧЭ выбирается с учетом размеров области оптического контакта модулятора.

Определим отражательную способность R_0 , соответствующую начальному зазору d_0 , и максимальное изменение отражательной способности $\Delta R_{\text{макс}}$ при расчетных вариациях рабочего зазора d . Начальное значение тока фотоприемника $I_{\text{ФП}0}$ при зазоре d_0 находим так:

$$I_{\text{ФП}0} = S_{\text{ФП}\lambda} P_0 + I_{\text{т}}, \quad (6)$$

где $P_0 = P_{\text{ИИ}} R_0 k_{\text{п}}$ — оптическая мощность на ФП при зазоре d_0 ($P_{\text{ИИ}}$ — оптическая мощность ИИ; $k_{\text{п}} = 0,5$ — коэффициент оптических потерь); $I_{\text{т}}$ — темновой ток ФП.

Максимальное приращение тока $\Delta I_{\text{ФПмакс}}$ определяется с учетом изменения отражательной способности $\Delta R_{\text{макс}}$:

$$\Delta I_{\text{ФПмакс}} = S_{\text{ФП}\lambda} P_0 k_{\text{п}} \Delta R_{\text{макс}}. \quad (7)$$

При использовании преобразователя ток–напряжение на операционном усилителе исходное значение выходного напряжения определяется как

$$U_{\text{ТН0}} = R_{\text{о.с}} I_{\text{ФП0}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{о.с}}$ — сопротивление в цепи обратной связи операционного усилителя, а максимальное изменение выходного напряжения преобразователя ток–напряжение — по выражению

$$\Delta U_{\text{ТНмакс}} = R_{\text{о.с}} \Delta I_{\text{ФПмакс}}. \quad (9)$$

Формирование функции преобразования, проходящей через начало координат, обеспечивается БО на операционных усилителях.

В результате расчета находят конструктивные параметры, обеспечивающие работу МОЭМ-преобразователя в диапазоне линейных ускорений $\pm a_{\text{макс}}$ и формирующие выходное напряжение в диапазоне $\pm U_{\text{вых_макс}}$ с заданной погрешностью нелинейности $\delta_{\text{нел}}$.

Программное обеспечение расчета балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ. Для расчета конструктивных параметров МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с помощью разработанного программного обеспечения необходимо заполнить поля: «Минимальное ускорение, м/с²», «Максимальное ускорение, м/с²», «Погрешность нелинейности, %», «Минимальное выходное напряжение, В», «Максимальное выходное напряжение, В», «Материал», расположенные в блоке «Входные параметры» программного обеспечения. Вместе с тем необходимо заполнить в блоке «Входные параметры» программного обеспечения параметры оптического модулятора на основе ОТЭ: «Показатель преломления n_1 », который равен n_3 , «Показатель преломления n_2 », «Длина волны ИИ, мкм», «Оптическая мощность ИИ, мВт», «Чувствительность ФП, А/Вт». Результаты расчета параметров балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения отображаются в окне программного обеспечения при введении исходных данных (рис. 5).

При следующих исходных данных: материал ЧЭ — кремний ($E = 168$ ГПа, $\rho = 2330$ кг/м³); $n_1 = 1,44$; $n_2 \approx 1,0$; $n_3 = 1,44$; диапазон измерения линейного ускорения ± 100 м/с²; нелинейность функции преобразования не более 0,6 %, получены следующие конструктивные параметры: длина ЧЭ $L = 10$ мм; толщина ЧЭ $h = 0,4$ мм; ширина ЧЭ $w = 4$ мм; длина волны ИИ $\lambda = 1,55$ мкм; угол при основании призмы $\alpha = 45^\circ$; угол падения излучения $\theta = 45^\circ$; начальный зазор $d_0 = 0,34$ мкм; $R_1 = 35$ кОм; $R_2 = 103,3$ кОм.

Входные параметры			Результаты расчета		
Минимальное ускорение	-100	м/с ²	Минимальный зазор	0.21	мкм
Максимальное ускорение	100	м/с ²	Максимальный зазор	0.47	мкм
Погрешность нелинейности	0.6	%	Диапазон перемещений ЧЭ	0.26	мкм
Минимальное выходное напряжение	-10	В	Начальный зазор	0.34	мкм
Максимальное выходное напряжение	10	В	Длина ЧЭ	10.0	мм
Материал	Тип материалов Кремний Кварц		Толщина ЧЭ	0.4	мм
Показатель преломления n1 = n3	1.44		Ширина ЧЭ	4.0	мм
Показатель преломления n2	1.0		Значение параметра m	1.1	
Длина волны ИИ	1.55	мкм	Угол падения излучения	45.0	град
Оптическая мощность ИИ	2.5	мВт	Напряжение смещения	6.3	В
Чувствительность ФП	0.5	А/Вт	Сопротивление R1	35.0	кОм
Расчет			Сопротивление R2	103.3	кОм

Рис. 5. Скриншот расчета балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе ОТЭ

Закключение. По результатам исследования модели балочного МОЭМ-преобразователя линейного ускорения сформирован набор параметров МОЭМ-преобразователя для измерения ускорений в заданном диапазоне $\pm a_{\text{макс}}$ с заданной погрешностью нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ функции преобразования. Диапазон изменений рабочего зазора определен по допустимому изменению чувствительности S оптического модулятора, задаваемому значением параметра m . Разработано программное обеспечение для определения конструктивных параметров узлов преобразователя для работы в заданном диапазоне линейных ускорений. Предложены алгоритм расчета МОЭМ-преобразователя линейного ускорения по исходным данным, использующий математическую модель преобразователя, и его программная реализация.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rahimi M., Taghavi M., Malekmohammad M. Coarse-to-fine optical MEMS accelerometer design and simulation. *Appl. Opt.*, 2022, vol. 61, no. 2, pp. 629–637. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.439762>
- [2] Sundar S., Gopalakrishna K., Thangadurai N. MOEMS-based accelerometer sensor using photonic crystal for vibration monitoring in an automotive system. *Int. J. Comput. Aided Eng. Technol.*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 206–224. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2021.113546>
- [3] Lu Q., Wang Y., Wang X., et al. Review of micromachined optical accelerometers: from mg to sub- μ g. *Opto-Electron. Adv.*, 2021, vol. 4, no. 3, art. 200045. DOI: <https://doi.org/10.29026/oea.2021.200045>
- [4] Liu H.F., Luo Z.C., Hu Z.K., et al. A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications. *Pet. Sc.*, 2022, vol. 19, no. 6, pp. 2631–2648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.005>
- [5] Jian A., Wei C., Guo L., et al. Theoretical analysis of an optical accelerometer based on resonant optical tunneling effect. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 2, art. 389. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17020389>
- [6] Antipov A.S., Kokunko J.G., Krasnova S.A., et al. Direct control of the endpoint of the manipulator under non-smooth uncertainty and reference trajectories. *J. Franklin Inst.*, 2023, vol. 360, no. 17, pp. 13430–13458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.10.001>
- [7] Krasnova S.A., Antipov A.S., Krasnov D.V., et al. Cascade synthesis of observers of mixed variables for flexible joint manipulators tracking systems under parametric and external disturbances. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 8, art. 930. DOI: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/8/1930>
- [8] Zhao X., Wang Y., Wen D. Fabrication and characteristics of a SOI three-axis acceleration sensor based on MEMS technology. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 4, art. 238. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10040238>
- [9] Lu Q., Bai J., Wang K., et al. Single chip-based nano-optomechanical accelerometer based on subwavelength grating pair and rotated serpentine springs. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 7, art. 2036. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18072036>
- [10] Nie Y., Huang K., Yang J., et al. A proposal to enhance high-frequency optical MEMS accelerometer sensitivity based on a one-dimensional photonic crystal wavelength modulation system. *IEEE Sens. J.*, 2020, vol. 20, no. 24, pp. 14639–14645. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3006220>
- [11] Ибрахим М.А., Лукьянов В.В. Алгоритмы и конфигурация системы ориентации подвижных объектов на микромеханических чувствительных элементах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 2 (131), с. 44–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-44-58>

- [12] Balasubramanian M., Krishnaswamy N., Pattnaik P.K. Optical MEMS accelerometer based on waveguide Bragg grating integrated with crab-leg beam. *IEEE SENSORS*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278931>
- [13] Wan F., Qian G., Li R., et al. High sensitivity optical waveguide accelerometer based on Fano resonance. *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, no. 24. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.006644>
- [14] Ahmadian M., Jafari K. A graphene-based wide-band MEMS accelerometer sensor dependent on wavelength modulation. *IEEE Sens. J.*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 6226–6232. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2908881>
- [15] Huang K., Nie Y., Liu Y., et al. A proposal for a high-sensitivity optical MEMS accelerometer with a double-mode modulation system. *J. Light. Technol.*, 2021, vol. 39, no. 1, pp. 303–309. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3023038>
- [16] Busurin V.I., Win Y.N., Zheglov M.A. Effect of linear acceleration on the characteristics of an optoelectronic ring transducer of angular velocity and its compensation. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 309–316. DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699019030142>
- [17] Коробков К.А. Разработка и исследование микрооптоэлектромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МАИ, 2021.
- [18] Barbin E.S., Nesterenko T.G., Koleda A.N., et al. A system for positioning an optical tunnel measuring transducer of a microoptoelectromechanical micro-g accelerometer. *IEEE 23rd EDM*, 2022, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855026>
- [19] Pham A.T., Nguyen V.T., Nguyen V.T., et al. Micro-opto-electro-mechanical transducers for measurement and control systems. *SSRG-IJEEE*, 2018, vol. 5, no. 10, pp. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V5I10P103>
- [20] Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М., Изд-во МАИ, 2012.
- [21] Bhaskaran P.R., Rathnam J.D., Koilmani S. A simple analytical model for MEMS cantilever beam piezoelectric accelerometer and high sensitivity design for SHM (structural health monitoring) applications. *Trans. Electr. Electron. Mater.*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.2.78>

Бусурин Владимир Игоревич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Макаренко Надежда Алексеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Зо Лвин Хту — аспирант кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бусурин В.И., Макаренкова Н.А., Зо Лвин Хту. Расчет балочного микрооптоэлектромеханического преобразователя линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 4 (149), с. 25–40. EDN: ZRJVRH

**COMPUTATION OF A BEAM MICRO-OPTO-ELECTRO-MECHANICAL
LINEAR ACCELERATION TRANSDUCER
BASED ON THE OPTICAL TUNNEL EFFECT**

V.I. Busurin

vbusurin@mai.ru

N.A. Makarenkova

n.a.makarenkova@yandex.ru

Zaw Lwin Htoo

zawlwinhtoo57@gmail.com

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers functional diagram of a linear acceleration transducer with a modulator based on the optical tunnel effect designed to obtain information on the nanometer motion of a beam sensitive element arising under the linear accelerations action. It determines a set of parameters of the optical modulator of the micro-opto-electro-mechanical linear acceleration transducer to ensure the linear accelerations measurement in a given range with a given nonlinearity error. Dependence of the conversion function nonlinearity error on the optical modulator sensitivity alteration range is identified basing on the optical tunnel effect when using the different wavelengths. The sensitive element motion range is determined by the permissible alteration in the optical modulator sensitivity depending on the value of the m parameter found with a given nonlinearity error in the conversion function. The paper proposes an algorithm for computing a beam micro-opto-electro-mechanical linear acceleration transducer based on the optical tunnel effect. The algorithm uses a mathematical model of the linear acceleration transducer and makes it possible to determine para-

Keywords

Micro-opto-electro-mechanical transducer, linear acceleration, optical modulator, optical tunnel effect, sensitivity, nonlinearity error, computation algorithm

meters of the optical, mechanical and electronic parts of the transducer based on a set of the initial data. Software is developed that implements the algorithm for computing design parameters of the beam micro-opto-electro-mechanical linear acceleration transducer to measure linear accelerations in a given range with a given nonlinearity error in the conversion function

Received 26.01.2024

Accepted 01.03.2024

© Author(s), 2024

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-29-00954, <https://rscf.ru/project/23-29-00954>)

REFERENCES

- [1] Rahimi M., Taghavi M., Malekmohammad M. Coarse-to-fine optical MEMS accelerometer design and simulation. *Appl. Opt.*, 2022, vol. 61, no. 2, pp. 629–637. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.439762>
- [2] Sundar S., Gopalakrishna K., Thangadurai N. MOEMS-based accelerometer sensor using photonic crystal for vibration monitoring in an automotive system. *Int. J. Comput. Aided Eng. Technol.*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 206–224. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2021.113546>
- [3] Lu Q., Wang Y., Wang X., et al. Review of micromachined optical accelerometers: from mg to sub- μ g. *Opto-Electron. Adv.*, 2021, vol. 4, no. 3, art. 200045. DOI: <https://doi.org/10.29026/oea.2021.200045>
- [4] Liu H.F., Luo Z.C., Hu Z.K., et al. A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications. *Pet. Sc.*, 2022, vol. 19, no. 6, pp. 2631–2648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.005>
- [5] Jian A., Wei C., Guo L., et al. Theoretical analysis of an optical accelerometer based on resonant optical tunneling effect. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 2, art. 389. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17020389>
- [6] Antipov A.S., Kokunko J.G., Krasnova S.A., et al. Direct control of the endpoint of the manipulator under non-smooth uncertainty and reference trajectories. *J. Franklin Inst.*, 2023, vol. 360, no. 17, pp. 13430–13458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.10.001>
- [7] Krasnova S.A., Antipov A.S., Krasnov D.V., et al. Cascade synthesis of observers of mixed variables for flexible joint manipulators tracking systems under parametric and external disturbances. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 8, art. 930. DOI: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/8/1930>
- [8] Zhao X., Wang Y., Wen D. Fabrication and characteristics of a SOI three-axis acceleration sensor based on MEMS technology. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 4, art. 238. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10040238>
- [9] Lu Q., Bai J., Wang K., et al. Single chip-based nano-optomechanical accelerometer based on subwavelength grating pair and rotated serpentine springs. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 7, art. 2036. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18072036>

- [10] Nie Y., Huang K., Yang J., et al. A proposal to enhance high-frequency optical MEMS accelerometer sensitivity based on a one-dimensional photonic crystal wavelength modulation system. *IEEE Sens. J.*, 2020, vol. 20, no. 24, pp. 14639–14645. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3006220>
- [11] Ibrakhim M.A., Lukyanov V.V. Algorithms and configuration for a moving object attitude control system based on microelectromechanical sensors. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 2 (131), pp. 44–58 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-44-58>
- [12] Balasubramanian M., Krishnaswamy N., Pattnaik P.K. Optical MEMS accelerometer based on waveguide Bragg grating integrated with crab-leg beam. *IEEE SENSORS*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278931>
- [13] Wan F., Qian G., Li R., et al. High sensitivity optical waveguide accelerometer based on Fano resonance. *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, no. 24. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.006644>
- [14] Ahmadian M., Jafari K. A graphene-based wide-band MEMS accelerometer sensor dependent on wavelength modulation. *IEEE Sens. J.*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 6226–6232. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2908881>
- [15] Huang K., Nie Y., Liu Y., et al. A proposal for a high-sensitivity optical MEMS accelerometer with a double-mode modulation system. *J. Light. Technol.*, 2021, vol. 39, no. 1, pp. 303–309. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3023038>
- [16] Busurin V.I., Win Y.N., Zheglov M.A. Effect of linear acceleration on the characteristics of an optoelectronic ring transducer of angular velocity and its compensation. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 309–316. DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699019030142>
- [17] Korobkov K.A. Razrabotka i issledovanie mikrooptoelektromekhanicheskogo adaptiruemogo preobrazovatelya lineynogo uskoreniya na osnove metodov dvukhkanal'noy obrabotki signalov. Dis. kand. tekhn. nauk [Development and research of micro-optoelectromechanical adaptable linear acceleration transducer based on two-channel signal processing methods. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Moscow, MAI, 2021 (in Russ.).
- [18] Barbin E.S., Nesterenko T.G., Koleda A.N., et al. A system for positioning an optical tunnel measuring transducer of a microoptoelectromechanical micro-g accelerometer. *IEEE 23rd EDM*, 2022, pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855026>
- [19] Pham A.T., Nguyen V.T., Nguyen V.T., et al. Micro-opto-electro-mechanical transducers for measurement and control systems. *SSRG-IJEEE*, 2018, vol. 5, no. 10, pp. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V5I10P103>
- [20] Busurin V.I., Gorshkov B.G., Korobkov V.V. Volokonno-opticheskie informatsionno-izmeritelnye sistemy [Fibre optic information and measurement systems]. Moscow, MAI Publ., 2012.
- [21] Bhaskaran P.R., Rathnam J.D., Koilmani S. A simple analytical model for MEMS cantilever beam piezoelectric accelerometer and high sensitivity design for SHM (structural health monitoring) applications. *Trans. Electr. Electron. Mater.*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.2.78>

Busurin V.I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic and Intelligent Control Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Makarenkova N.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic and Intelligent Control Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Zaw Lwin Htoo — Post-Graduate Student, Department of Automatic and Intelligent Control Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Busurin V.I., Makarenkova N.A., Zaw Lwin Htoo. Computation of a beam micro-opto-electro-mechanical linear acceleration transducer based on the optical tunnel effect. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 4 (149), pp. 25–40 (in Russ.). EDN: ZRJVRH