

УДК 53.082, 531.7.08, 681.2, 681.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЬЕЗООПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© А. Г. Паулиш^{1,2}, П. С. Загубисало¹

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Новосибирский государственный технический университет,

630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: paulish63@ngs.ru

Методами численного моделирования проведён расчёт зависимости коэффициента тензо-чувствительности для пьезооптических датчиков механических напряжений от геометрических параметров его фотоупругого элемента. Показано, что чувствительность к силе пьезооптического датчика сильнее зависит от формы фотоупругого элемента, чем чувствительность к деформации. Проведён сравнительный анализ коэффициентов тензочувствительности и других параметров тензорезисторных, пьезоэлектрических, оптоволоконных и пьезооптических датчиков деформации как наиболее широко применяемых в промышленности. Коэффициенты тензочувствительности тензорезисторных и волоконно-оптических датчиков на три порядка ниже коэффициентов пьезооптических датчиков. Корректно рассчитанный коэффициент тензочувствительности пьезоэлектрических датчиков также на два-три порядка уступает коэффициенту пьезооптических датчиков. Проведено сравнение свойств и параметров современных промышленных датчиков механических напряжений, основанных на разных физических принципах, и показаны преимущества пьезооптических датчиков.

Ключевые слова: тензометрия, датчики механических напряжений, пьезооптический эффект, пьезооптические датчики, пьезоэлектрические датчики, тензорезисторные датчики.

DOI: 10.15372/AUT20190312

Введение. Измерение механических напряжений является главным экспериментальным методом изучения напряжённых состояний в различных конструкциях. В настоящее время в промышленности наиболее широко используемые устройства для измерения механических напряжений — датчики, основанные на тензорезистивном [1] и пьезоэлектрическом эффектах [2–8], а также волоконно-оптические датчики [9–11]. Однако датчики имеют ряд неустраняемых недостатков. Тензорезисторным и пьезоэлектрическим датчикам присущи неустойчивость и деградация параметров со временем, гистерезис, нелинейность, малый динамический диапазон, низкая чувствительность к деформации и высокая чувствительность к перегрузкам [12]. Чувствительность волоконно-оптических датчиков деформации [13] в 2,5–5 раз меньше тензорезисторных. В [14–16] предложен пьезооптический датчик новой конструкции, который имеет более высокую чувствительность к деформации, чем другие, благодаря принципиально высокой чувствительности фазы световой волны к напряжённому состоянию вещества [17–21].

При описании чувствительности датчиков используются различные величины, что затрудняет их сравнение. Например, для пьезоэлектрических датчиков приводится пьезоэлектрический модуль размерностью Кулон/Ньютон (Кл/Н), в то время как тензорези-

сторные датчики характеризуются безразмерной величиной — коэффициентом тензочувствительности: отношением относительного изменения измеряемой величины к относительному удлинению. При таком определении коэффициент тензочувствительности является наиболее объективным параметром при сравнении чувствительности датчиков разных конструкций и на различных принципах. В научной литературе отсутствуют данные о сравнительном анализе тензочувствительности применяемых в промышленности датчиков деформации на разных физических принципах, что затрудняет объективную оценку их преимуществ и недостатков.

Целью представленной работы являются определение коэффициента тензочувствительности пьезооптического датчика механических напряжений, выяснение его зависимости от конструктивного исполнения датчика, корректный расчёт коэффициента тензочувствительности пьезоэлектрических датчиков и сравнение с коэффициентами тензочувствительности тензорезисторных и волоконно-оптических датчиков.

Теоретические основы. Пьезооптический эффект (эффект фотоупругости) заключается в анизотропном изменении показателя преломления вещества под действием осевой нагрузки. Приложенная сила вызывает анизотропное изменение показателя преломления (двулучепреломление) изначально изотропной среды благодаря деформации электронных оболочек атомов. Разница Δn приводит к разнице фаз Δ двух ортогональных поляризаций световой волны, прошедшей напряжённый фотоупругий материал [17–19].

Коэффициент тензочувствительности пьезооптического датчика может быть определён по аналогии с тензорезисторными датчиками [12]. Измеряемым параметром пьезооптического эффекта является разность фаз Δ , обусловленная напряжениями и измеряемая методами эллипсометрии [22]. Выражение коэффициента тензочувствительности пьезооптического датчика может быть записано как

$$S_A = \frac{\Delta}{dL/L} = 2\pi l K \frac{\Delta\sigma}{\lambda} \frac{L}{dL} = \frac{2\pi l}{\lambda} K E, \quad (1)$$

где l — расстояние, пройденное лучом в напряжённом материале; K — пьезооптический коэффициент (упругооптическая постоянная) с типичным значением 10^{-11} – 10^{-12} Па $^{-1}$ для большинства оптических материалов; $\Delta\sigma$ — разница напряжений вдоль и поперёк приложенной силы в плоскости, перпендикулярной распространению луча света; λ — длина волны света; $\Delta\sigma = E(dL/L)$ — закон Гука, где E — модуль Юнга, dL/L — относительная деформация фотоупругого материала. Видно, что коэффициент тензочувствительности пьезооптического датчика зависит не только от материала (параметры K и E), но и от толщины l чувствительного элемента преобразователя — фотоупругого элемента (ФЭ) и рабочей длины волны λ , а $\Delta\sigma$, как было показано в [14], при заданной внешней силе определяется конструкцией ФЭ.

Численное моделирование. В [14] путём численного моделирования методом конечных элементов показано, что при одинаковой внешней силе крестообразная форма ФЭ позволяет существенно повысить концентрацию напряжений в его рабочей области по сравнению с прямоугольной или круглой формой ФЭ. В результате удаётся увеличить чувствительность датчика к измеряемой силе.

В предлагаемой работе проведено моделирование чувствительности пьезооптического преобразователя к относительной деформации, т. е. коэффициента тензочувствительности при варьировании формы ФЭ [14]. Для этого необходимо определить разность фаз Δ , которую приобретают лучи после крестообразного ФЭ, и деформацию (dL/L) ФЭ с разными геометрическими параметрами. В исследовании проведены расчёты изменения амплитуды и поляризации световой волны при прохождении оптических элементов пьезооптического преобразователя (ПП) с крестообразным ФЭ из кварцевого стекла в охранном кольце

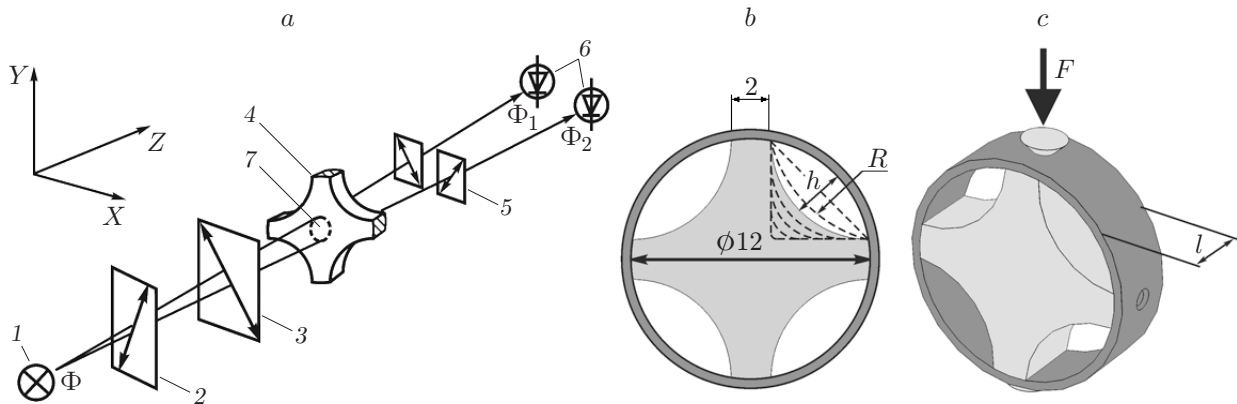


Рис. 1. Пьезооптический преобразователь: *a* — оптическая схема (1 — светодиод, 2 — поляризатор, 3 — четвертьволновая пластина, 4 — фотоупругий элемент, 5 — анализаторы, 6 — фотодетекторы, 7 — рабочая область ФЭ); *b* — геометрические параметры ФЭ в охранном кольце; *c* — вид модели ФЭ и схема приложения силы

Таблица 1

Параметры пьезооптического преобразователя

Элемент	Параметр
Светодиод	LEDVS665NJ2 (FirstSensor, США)
Промежуток светодиод — поляризатор	7,8 мм
Промежуток поляризатор — пластина $\lambda/4$	2,5 мм
Толщина $\lambda/4$ пластины (из слюды), $l_{\lambda/4}$	40 ± 2 мкм
Промежуток пластина $\lambda/4$ — ФЭ	2,25 мм
Толщина ФЭ, l	2–8 мм
Промежуток ФЭ — анализаторы	1,8 мм
Промежуток анализаторы — фотодиоды	1,36
Рабочая апертура пластины $\lambda/4$	3 мм
Размер рабочей области ФЭ	$\varnothing 2,3$ мм
Геометрическая длина светового пути	19,71 мм
Фотодиод	QP10-6 (FirstSensor, США)

(рис. 1, *a–c*) [14, 15]. Диаметр ФЭ составил 12 мм, ширина торца ФЭ — 2 мм. Радиус кривизны боковой поверхности варьировался в пределах $R = 0,5–0,6$ мм, расстояние h — в пределах 0–4,5 мм [14], толщина ФЭ — в пределах $l = 2–8$ мм, а толщина охранного кольца составляла 0,5 мм.

Пространственное распределение напряжений $\Delta\sigma_{ФЭ}$ в рабочей области ФЭ под действием силы F определялось по аналогии с [14] с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Для моделирования использовалась математическая 3D-модель ФЭ в охранном кольце (рис. 1, *b, c*) [15]. К модели прикладывалась внешняя сила F посредством стальных клиньев в форме усечённого конуса. Данная схема приложения силы максимально близка к реальному устройству ПП. Из множества различных вычислительных методов, позволяющих справляться с громоздкими количественными расчётами, использовался формализм Мюллера с параметрами Стокса, в котором применялась матричная алгебра для описания амплитудных и поляризационных преобразований электромагнитной волны [11, 23, 24]. Расчёты преобразования параметров электромагнитной волны проводились в среде программирования Python с учётом конструктивных параметров преобразователя, указанных

в табл. 1. После подстановки всех матриц преобразования [16] изменение фазы луча электромагнитной волны $\Delta_{\text{ПП}}(X, Y)$, проходящего ФЭ в точке с координатами (X, Y) , определяется выражением

$$\begin{aligned} \sin(\Delta_{\text{ПП}}(X, Y)) &= \sin(\delta_{\lambda/4}) \cdot \sin(\Delta_{\text{ФЭ}}(X, Y)) = \\ &= \sin\left(\frac{2\pi l_{\lambda/4} \Delta n_{\lambda/4}}{\lambda}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi l \Delta \sigma_{\text{ФЭ}}(X, Y)}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\delta_{\lambda/4}$ — набег фазы электромагнитной волны при прохождении четвертьволновой пластины; $\Delta_{\text{ФЭ}}(X, Y)$ — набег фазы при прохождении ФЭ в точке с координатами (X, Y) ; $l_{\lambda/4} = 40$ мкм — толщина четвертьволновой пластины из слюды; $\Delta n_{\lambda/4} = 0,038$ — характеристика двулучепреломления слюды; $l = 2-8$ мм — толщина ФЭ; $\Delta \sigma_{\text{ФЭ}}(X, Y)$ — пространственное распределение напряжений в рабочей области ФЭ. Интенсивности световых потоков Φ_1 и Φ_2 , падающих на фотодетекторы ФД₁ и ФД₂ (см. рис. 1, а), получались суммированием интенсивности лучей, проходящих через рабочую область ФЭ с координатами (X, Y) и попадающих на светочувствительные площадки фотодетекторов. Величины фототоков I_1 и I_2 с фотодетекторов ФД₁ и ФД₂ получались умножением потоков Φ_1 и Φ_2 на квантовые эффективности фотодетекторов q_1, q_2 . Полагалось, что $q_1 = q_2$. Электронная система регистрации обеспечивала измерение дифференциального сигнала I_{Δ} :

$$I_{\Delta} = k(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2), \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, определяемый коэффициентами усиления фототоков в электронной схеме ПП. Если не учитывать коэффициенты усиления, то $k = 1$ и выходной сигнал

$$I_{\Delta} = \sin(\Delta_{\text{ПП}}) \approx \Delta_{\text{ПП}} \quad \text{при} \quad \Delta_{\text{ПП}} \ll 1. \quad (4)$$

Моделирование показало, что использование оптической схемы с лучами, пространственно разделёнными вдоль фронта волны (см. рис. 1, а), и дифференциальной схемы формирования выходного сигнала (3) позволяет применять следующее упрощающее предположение: рассматривались два выходящих из светодиода луча Φ_1 и Φ_2 . Лучи Φ_1 и Φ_2 проходят через анализаторы A_1 и A_2 и падают на фотодетекторы ФД₁ и ФД₂ соответственно. Для простоты лучи считались принадлежащими плоской волне и падающими под прямым углом на элементы оптической схемы. Усреднение $\Delta \sigma_{\text{ФЭ}}(X, Y)$ по рабочей области ФЭ давало величину $\Delta \sigma_{\text{ФЭ сред}}$, которая использовалась в расчётах (далее под $\Delta \sigma_{\text{ФЭ}}$ имеется в виду $\Delta \sigma_{\text{ФЭ сред}}$, а под $\Delta_{\text{ПП}}$ — $\Delta_{\text{ПП сред}}$). Установлено, что упрощения не влияли на результаты расчётов.

Результаты расчётов и моделирования. При варьировании геометрических параметров ФЭ величина силы выбиралась такой, чтобы обеспечить одинаковую величину деформации ФЭ в направлении приложения силы (см. рис. 1), а именно $dL = 100$ нм. На рис. 2 показана полученная зависимость S_A от параметра h (см. рис. 1). Квадрату на оси абсцисс соответствует ФЭ квадратной формы, нулю — ФЭ круглой формы, а остальным точкам — ФЭ крестообразной формы с разными h и R [14]. Из рис. 2 видно, что зависимость S_A от h является немонотонной и содержит два локальных максимума, обусловленных, по-видимому, вкладом нелинейно изменяющейся формы боковых поверхностей ФЭ в его упругие свойства. Изменения S_A во всём диапазоне h составили примерно 5,4 % от начальной величины, что существенно меньше, чем изменение величины разности напряжений $\Delta \sigma_{\text{ФЭ}}$, полученной в [14] и составившей почти 100 %. Это связано с тем, что

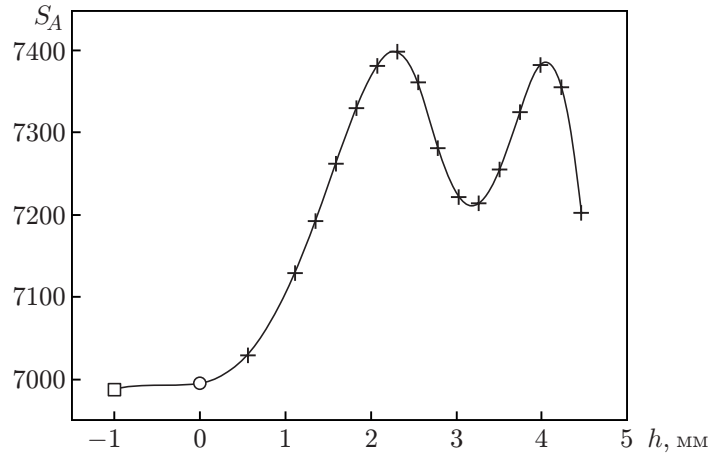


Рис. 2. Зависимость коэффициента тензочувствительности пьезооптического датчика S_A от параметра h

с увеличением h уменьшается жёсткость ФЭ (эффективный модуль Юнга — $E_{\text{эфф}}$) в направлении приложения силы, что, в свою очередь, приводит к повышению относительной деформации dL/L при заданной силе и снижению S_A . Зная полученные при моделировании значения $\Delta\sigma_{\text{ФЭ}}$ и dL/L и используя закон Гука, можно определить $E_{\text{эфф}}$ для каждой конкретной конструкции ФЭ:

$$E_{\text{эфф}} = \Delta\sigma_{\text{ФЭ}} / (dL/L). \quad (5)$$

Для $h = 2,5$ мм величина $E_{\text{эфф}} \approx 59$ ГПа. Эта величина несколько меньше, чем для объёмного плавленого кварца ($E = 70$ ГПа), и является характеристикой конкретной конструкции ФЭ. Для других конструкций модуль $E_{\text{эфф}}$ будет иным. Поэтому задачей конструирования формы ФЭ и способа передачи на него внешней силы является получение максимально возможного эффективного модуля упругости $E_{\text{эфф}}$. Применительно к $E_{\text{эфф}}$ выражение (1) принимает вид

$$S_A = \Delta_{\text{ПП}} / (dL/L) = 2\pi l K E_{\text{эфф}} / \lambda. \quad (6)$$

Для $h = 2,5$ мм величина $S_A = 7389$ хорошо согласуется с экспериментальным значением $S_{A,\text{эксп}} = 7340$ [15], что в целом подтверждает правильность модели и расчётов. В итоге каждый ПП имеет свой коэффициент тензочувствительности S_A , который зависит от его конструкции и может быть улучшен.

На рис. 3 показана зависимость S_A от толщины l ФЭ при $h = 2,55$ мм и $R = 5$ мм. Видно, что величина изменений S_A пренебрежимо мала ($\approx 0,6\%$). С одной стороны, это связано с тем, что при увеличении l площадь приложения силы растёт примерно пропорционально l , а значит, снижаются давление и величина $\Delta\sigma_{\text{ФЭ}}$ обратно пропорционально l (1). С другой стороны, величина $\Delta_{\text{ФЭ}}$ прямо пропорциональна l (1). В итоге эти два фактора практически компенсируют друг друга.

Сравнение коэффициентов тензочувствительности датчиков на основе разных физических принципов. Кратко рассмотрим физические явления, используемые для измерения механических напряжений.

1. Тензорезистивный эффект заключается в изменении сопротивления R линейного проводника длиной L , сечением A и удельным сопротивлением ρ при приложении вдоль

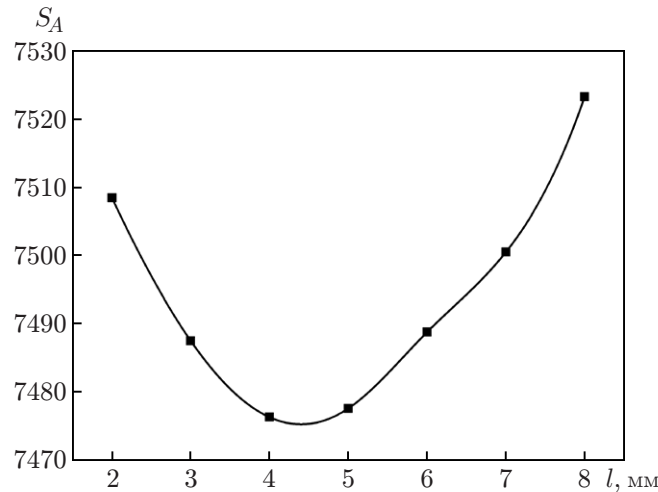


Рис. 3. Зависимость коэффициента тензочувствительности пьезооптического датчика S_A от толщины l ФЭ

него силы F . В случае упругой деформации коэффициент тензочувствительности имеет вид

$$S_A = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} + 1 + 2\nu - \nu^2 \frac{dL}{L}, \quad (7)$$

где dR/R — относительное изменение сопротивления; $d\rho/\rho$ — относительное изменение удельного сопротивления; ν — коэффициент Пуассона, обычно равный 0,3 [12]. Видно, что величина S_A не зависит от конструкции датчика, а определяется лишь свойствами его материала $d\rho/\rho$. В зависимости от используемого материала для изготовления чувствительного элемента, воспринимающего нагрузку, численные значения S_A тензорезисторных датчиков лежат в пределах $S_A = 2-4$ [12].

2. Быстрое развитие волоконно-оптических технологий привело к появлению датчиков деформации, которые устойчивы к воздействию окружающей среды и обладают электромагнитной помехоустойчивостью [9–13]. Чувствительным элементом датчиков является волоконная брэгговская решётка, представляющая собой оптическое волокно, в котором реализовано периодическое изменение показателя преломления. При прохождении света через такую структуру часть его с определённой длиной волны (λ_B) отражается, а остальная часть проходит дальше. Длина волны λ_B отражённого света задаётся соотношением $\lambda_B = 2nZ$, где n — эффективный показатель преломления оптического волокна, Z — расстояние между решётками или период решётки. При растяжении/сжатии волокна меняются расстояние Z и показатель преломления n , что приводит к изменению λ_B , которое регистрируется оптической системой. Коэффициент тензочувствительности волоконно-оптических датчиков деформации находится по аналогии с тензорезисторными датчиками [13]:

$$S_A = (d\lambda_B/\lambda_B)/(dZ/Z), \quad (8)$$

где $d\lambda_B$ — изменение длины волны отражённого света при деформации волоконной решётки; dZ/Z — относительная деформация решётки. Согласно [13] коэффициент тензочувствительности волоконно-оптических датчиков деформации составляет около 0,78, что заметно меньше, чем у тензорезисторных датчиков. Как и в случае тензорезисторных

Таблица 2

Параметры некоторых пьезоэлектрических материалов

Материал	d_{ij} , 10^{-12} Кл/Н	E , ГПа	S_A
Цирконато-титанат свинца (ЦТС, PZT):			
ЦТС-19	160–330	70	11,2–23,1
ЦТС-21	40–100	90	2,8–7,0
ЦТСНВ-1	160–400	64	10,2–26,6
PZT-5A (США)	274–593	60	16,4–35,6
PZT-6A (США)	80–189	94	7,5–17,8
PZT-6B (США)	27–71	111	3,0–7,8
Кристаллический кварц	2,33	78,7	0,16
Титанат бария ($BaTiO_3$)	78	100	7,8
Твёрдые растворы $(K, Na)NbO_3$	80–160	104–123	8,3–19,7
Неполярные полимеры (полиэтилен, каучуки и др.)	0,1–1,0	1–3	$0,1–3 \cdot 10^{-3}$
Полярные полимеры (поликарбонат, поливинилхлорид)	20–40	2,3–3,5	0,05–0,14
Электроактивные полимеры	30 000	$(6–1000) \cdot 10^{-6}$	<0,03

датчиков, он не зависит от конструкции датчика и определяется свойствами материала оптоволокна.

3. Пьезоэлектрический датчик преобразует механическое усилие в электрический заряд. Его действие основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, который заключается в возникновении поляризации диэлектрика под влиянием механических напряжений. Плотность наведённого электрического заряда, возникающего на поверхности пьезоэлемента под действием внешней нагрузки, описывается уравнением [3]

$$\Delta q = d_{ij}\sigma, \quad (9)$$

где Δq — поверхностная плотность заряда; d_{ij} — пьезоэлектрический модуль, описываемый матрицей размера 3×6 , с типичными значениями компонентов в диапазоне 10^{-10} – 10^{-12} Кл/Н; σ — напряжение в материале под действием внешней нагрузки. При описании чувствительности таких датчиков используется пьезоэлектрический модуль, что затрудняет их сравнение с тензорезисторными и волоконно-оптическими датчиками. По аналогии с (7) и (8) коэффициент тензочувствительности для пьезоэлектрических датчиков должен быть обратно пропорционален относительной деформации dL/L . Воспользуемся законом Гука $\sigma = E(dL/L)$ и соотношением (9) для определения коэффициента тензочувствительности:

$$S_A = \frac{\Delta q}{dL/L} = \frac{d_{ij}\sigma}{dL/L} = \frac{d_{ij}E(dL/L)}{dL/L} = d_{ij}E. \quad (10)$$

Из (10) следует, что S_A не зависит от конструкции датчика и задаётся только свойствами материала пьезоэлемента. В табл. 2 приведены значения пьезоэлектрических модулей, модулей Юнга, заимствованные из [3, 4], и рассчитанные по формуле (10) коэффициенты тензочувствительности некоторых материалов, широко используемых для изготовления пьезоэлектрических датчиков.

Таблица 3

Параметры тензодатчиков

Параметр	Тип датчика			
	Тензо-резисторный	Пьезо-электрический	Волоконно-оптический	Пьезо-оптический
S_A	2–4	0,1–35,6	0,78	>7000
Зависимость S_A от конструкции датчика	нет	нет	нет	да
Крутизна преобразования деформация \rightarrow ток, мкА/мкм	—	80	—	1100–50 000
Чувствительность к относительной деформации	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$< 6 \cdot 10^{-10}$
Погрешность измерений, %	0,05–0,1	—	0,25–1,0	0,01–0,03
Динамический диапазон	10^3 – 10^4	10^3	10^3	$> 5 \cdot 10^4$
Гистерезис, %	0,5	нет	нет	нет
Деградация параметров со временем	есть	есть	нет	нет
Тип измеряемых нагрузок	Динамические, статические	Динамические	Статические	Динамические, статические

Именно S_A (а не пьезомодуль) является объективным параметром чувствительности пьезоэлектрических датчиков при сравнении с чувствительностью датчиков, основанных на других физических принципах. Например, пьезомодуль для электроактивных полимеров более чем на два порядка превышает пьезомодули других пьезоматериалов. Однако это преимущество сводится практически к нулю малым модулем упругости, и в итоге коэффициент тензочувствительности становится на два порядка меньше, чем у других материалов. Из табл. 2 видно, что коэффициенты тензочувствительности пьезоэлектрических датчиков по порядку величины сравнимы с коэффициентами тензорезисторных датчиков. В табл. 3 суммированы основные характеристики датчиков деформации, взятые из [3, 4, 12, 13, 15] и полученные в данной работе. Видно, что пьезооптический датчик выгодно отличается от датчиков других типов по всем приведённым параметрам.

Заключение. Коэффициент тензочувствительности пьезооптического датчика на кварцевом стекле, полученный численным моделированием напряжений и деформаций в ФЭ, подтверждает результат эксперимента и на два-три порядка превышает коэффициенты тензочувствительности датчиков, основанных на других физических принципах. Величина коэффициента тензочувствительности для пьезооптического датчика зависит от его конструкции и может быть повышена оптимизацией формы ФЭ. В работе показано, что зависимости чувствительности к силе и деформации от формы фотоупругого элемента для пьезооптических датчиков ведут себя по-разному. Это необходимо учитывать при практическом применении таких датчиков для измерения деформации или силы. Несмотря на высокие значения пьезоэлектрических модулей новых пьезоматериалов, коэффициенты тензочувствительности пьезоэлектрических датчиков находятся на уровне тензорезисторных датчиков. Пьезооптический датчик не содержит материалов, чьи свойства меняются со временем, поэтому в нём не должно быть гистерезиса и деградации параметров, кото-

рые присущи тензорезисторным и пьезоэлектрическим датчикам. Таким образом, пьезооптические преобразователи являются наиболее перспективными для создания надёжных малогабаритных высокочувствительных датчиков механических напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агейкин Д. И., Костина А. Н., Кузнецова Н. Н.** Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965. 928 с.
2. **Ржанов А. В.** Титанат бария — новый сегнетоэлектрик // УФН. 1949. **38**, № 4. С. 461–489.
3. **Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В.** Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
4. **Луцейкин Г. А.** Новые полимерсодержащие пьезоэлектрические материалы // Физика твердого тела. 2006. **48**, № 6. С. 963–964.
5. **Qiu L., Deng X., Yuan S. et al.** Impact monitoring for aircraft smart composite skins based on a lightweight sensor network and characteristic digital sequences // Sensors. 2018. **18**, N 7. P. 2218.
6. **De Inestrillas Á. S., Camarena F., Cabo M. B. et al.** Design and performance of a metal-shielded piezoelectric sensor // Sensors. 2017. **17**, N 3. P. 1284.
7. **Vitola J., Pozo F., Tibaduiza D. A., Anaya M.** Distributed piezoelectric sensor system for damage identification in structures subjected to temperature changes // IEEE Sensors. 2017. **17**, N 6. P. 1252.
8. **Li M., Cheng W., Chen J. et al.** A high performance piezoelectric sensor for dynamic force monitoring of landslide // Sensors. 2017. **17**, N 2. P. 394.
9. **Wei P., Han X., Xia D. et al.** Novel fiber-optic ring acoustic emission sensor // Sensors. 2018. **18**, N 1. P. 215.
10. **Drissi-Habti M., Raman V., Khadour A., Timorian S.** Fiber optic sensor embedment study for multi-parameter strain sensing // Sensors. 2017. **17**, N 4. P. 667.
11. **Удд Э.** Волоконно-оптические датчики. М.: Техносфера, 2008. 198 с.
12. **Экспериментальная механика** /Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. Кн. 1. 616 с.
13. **Клекерс Т., Гюнтер Б.** Измерение деформаций: Оптоволоконные сенсоры компании НВМ // Электроника: НТБ. 2008. № 1. С. 76–78.
14. **Паулиш А. Г., Загубисало П. С.** Фотоупругий элемент для пьезооптических датчиков деформаций // Письма в ЖТФ. 2015. **41**, № 13. С. 33–40.
15. **Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Бараков В. Н., Павлов М. А.** Экспериментальное исследование пьезооптического преобразователя для высокочувствительных датчиков деформации // Автометрия. 2018. **54**, № 2. С. 78–84.
16. **Paulish A. G., Zagubisalo P. S., Barakov V. N. et al.** Piezo-optical transducer for high sensitive strain gauges // IEEE Sensors Journ. 2018. **18**, N 20. P. 8318–8328. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2865917.
17. **Frocht M. M.** Photoelasticity. N. Y.: Wiley-Interscience, 1948. Vol. 1. 432 p.
18. **Doyle J. F.** Modern experimental stress analysis. Chichester: John Wiley and Sons, 2004. P. 158–170.
19. **Поляризаторно-оптический** метод исследования напряжений: Сб. ст. Л.: Изд-во ЛГУ им. А. А. Жданова, 1966. 423 с.
20. **Слезингер И. И.** Виброметрия. М.: Знание, 1973. С. 49–51.

21. **Слезингер И. И.** Пьезооптические измерительные преобразователи // Измерительная техника. 1985. № 11. С. 45–48.
22. **Аззам Р., Башара Н.** Эллипсометрия и поляризационный свет /Под ред. А. В. Ржанова, К. К. Свиташева. М.: Мир, 1981. 583 с.
23. **Kliger D. S., Lewis J. W., Randall C. E.** Polarized Light in Optics and Spectroscopy. Boston: Academic Press, 1990. 305 p.
24. **Theocaris P. S., Gdoutos E. E.** Matrix theory of photoelasticity. N. Y.: Springer-Verlag, 1979. 352 p.

Поступила в редакцию 13.02.2019

После доработки 13.03.2019

Принята к публикации 18.03.2019
