

05;15

Фотоупругий элемент для пьезооптических датчиков деформаций

© А.Г. Паулиш, П.С. Загубисало

Филиал Института физики полупроводников СО РАН
„Конструкторско-технологический институт прикладной
микроэлектроники“, Новосибирск
E-mail: paulish63@ngs.ru

Поступило в Редакцию 17 декабря 2014 г.

Изучены фотоупругие и механические свойства нового фотоупругого элемента для пьезооптических преобразователей, используемых для измерения деформаций (напряжений). Фотоупругий элемент изготовлен из пластины плавленого кварца и имеет крестообразную форму, при этом боковые поверхности имеют постоянный и/или переменный радиус кривизны. Численное моделирование упругих напряжений, возникающих в объеме фотоупругого элемента при рабочих нагрузках, показало, что при одинаковом рабочем усилии крестообразная форма позволяет существенно повысить концентрацию напряжений в актуальной области фотоупругого элемента по сравнению с прямоугольной или круглой формой. Численное моделирование прочностных характеристик данного фотоупругого элемента позволило определить оптимальный баланс между повышением эффективности фотоупругого элемента и изменением порога разрушения за счет изменения формы элемента.

Эффект фотоупругости (по-другому называемый пьезооптический эффект) используется для прецизионного измерения напряжений (или деформаций) с 30-х годов прошлого века [1]. Механические напряжения, прикладываемые к исходно изотропному материалу (например, стеклу), приводят к деформации электронных оболочек атомов, что в свою очередь приводит к анизотропному изменению коэффициента преломления. В результате в материале возникает эффект двулучепреломления. Если на данный материал падает световая волна с вектором линейной поляризации, ориентированным под определенным углом к оси напряжений, то в результате двулучепреломления возникает разность фаз между компонентами поляризации поперек и вдоль оси

напряжений [2]. Преобразование разности фаз в выходной электрический сигнал, пропорциональный величине приложенной нагрузки, осуществляется с помощью пьезооптического преобразователя, одна из схем которого приведена на рис. 1, *a*, где 1 — источник света (обычно светодиод), 2 — поляризатор, 3 — четвертьволновая пластина, 4 — фотоупругий элемент, к которому прикладывается измеряемая внешняя сила f , 5 — анализаторы, ориентированные под углом 90° друг к другу, 6 — фотоприемники [3]. Ключевым элементом пьезооптического преобразователя является фотоупругий элемент (ФЭ), который бывает разных форм: параллелепипед [4], усеченный конус или цилиндр [5,6]. Фотоупругий элемент крепится в нагрузочном элементе (на рисунке не показан), с помощью которого внешняя нагрузка передается на ФЭ. Актуальной областью ФЭ является только та область, проходя через которую, свет попадает на фотоприемники (штриховая окружность на рис. 1, *a* и *b*). Остальная часть ФЭ не принимает участия в формировании выходного сигнала. В литературе не известны исследования, направленные на выяснение зависимости формы ФЭ и способа его крепления в нагрузочном элементе на распределение напряжений в актуальной области ФЭ, которые определяют чувствительность преобразователя.

В данной работе методами численного моделирования проведено исследование распределения напряжений в ФЭ разных конструкций, возникающих при приложении внешней нагрузки, с целью определения оптимальной формы ФЭ, максимально передающей внешнее прикладываемое напряжение в актуальную область ФЭ.

В качестве материала ФЭ был выбран плавленный кварц, представляющий наибольший практический интерес благодаря высокому порогу разрушения на сжатие, что обеспечивает высокий динамический диапазон измерений деформаций и надежность преобразователя. Кроме того, технология обработки плавленного кварца хорошо развита. Были рассмотрены прямоугольная (рис. 1, *a*), круглая и крестообразная формы ФЭ [7] одинакового поперечного размера 12 mm (рис. 1, *b*). Толщина ФЭ всех форм бралась одинаковой и равной 4 mm. Размеры ФЭ брались исходя из размеров реально используемых ФЭ. Крестообразная форма ФЭ также варьировалась изменением величины „углубления“ h , показанного на рис. 1, *b*, которая отсчитывалась по радиусу от окружности, описывающей крестообразные ФЭ.

Разность фаз между продольными и поперечными компонентами поляризации после прохождения напряженного оптического материала

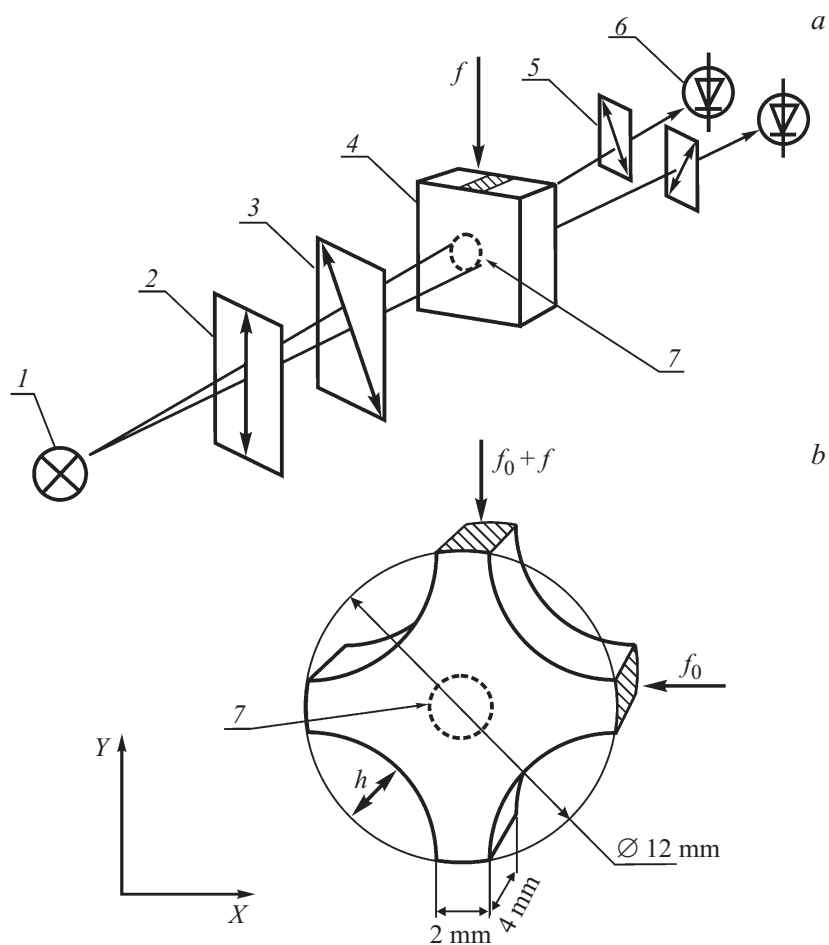


Рис. 1. *a* — схема пьезооптического преобразователя; *b* — формы фотоупругого элемента и схема приложения силы. f_0 — сила предварительного двухосного сжатия.

толщиной l определяется выражением [3]

$$\Delta = 2\pi l(n_{\perp} - n_{\parallel})/\lambda = 2\pi lK\Delta\sigma/\lambda,$$

где n_{\perp} и n_{\parallel} — коэффициенты преломления поперек и вдоль оси напряжений соответственно, l — длина хода лучей (в нашем случае толщина

ФЭ), λ — длина волны света, K — упругооптический коэффициент, $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ — разность напряжений по осям X и Y (рис. 1, *b*). Расчеты величины $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ проводились методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Внешняя сила f прикладывалась к ФЭ крестообразной формы в направлении оси Y однородно к торцу шириной 2 mm и глубиной 4 mm (заштрихованная область на рис. 1, *b*). Такая же площадка использовалась для приложения силы к круглому и квадратному ФЭ для корректного сравнения. Тем не менее в большинстве известных конструкций пьезооптических преобразователей ФЭ имеет форму параллелепипеда, и нагрузка к нему прикладывается однородно ко всему торцу. Используются даже специальные дополнительные приспособления, чтобы обеспечить однородность прикладываемой нагрузки. Для сравнения с такими ФЭ было проведено моделирование напряжений с приложением внешней силы однородно ко всему торцу квадратного ФЭ, т. е. к площадке 12×4 mm.

При проведении моделирования ФЭ предварительно сжимался в направлении осей X и Y с одинаковой силой f_0 (рис. 1, *b*). Создание исходного напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет, во-первых, работать ФЭ одинаково эффективно как на сжатие, так и на растяжение. Во-вторых, действие исходной силовой нагрузки в двух взаимно перпендикулярных направлениях обеспечивает неизменность распределения напряжений в фотоупругом элементе при деформациях, связанных с изменением температуры, что, в свою очередь, обеспечивает температурную независимость сигнала [5]. На рис. 2 показаны результаты численного моделирования напряжений в ФЭ разной формы при одинаковой внешней силе $f = 4$ N и силе предварительного сжатия $f_0 = 1$ N. Значения сил выбирались достаточно произвольно, так как от их величины качественная картина распределения напряжений в ФЭ не зависит. Для каждой формы ФЭ приведены изолинии $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$, численные значения величины $\Delta\sigma$ указаны в МПа. Величина „углубления“ h на рис. 2, *b, c, d*, равнялась 0, 2.55, 4.0 mm соответственно. Исходя из реальных конструкций пьезооптических преобразователей, мы взяли размер актуальной области ФЭ, равный $\varnothing 2.3$ mm. Напряжения только в этой области и определяют величину выходного электрического сигнала, т. е. чувствительность преобразователя. Выходной сигнал пьезооптического преобразователя пропорционален величине напряжений $\Delta\sigma_{av}$, усредненной по актуальной области диаметром 2.3 mm.

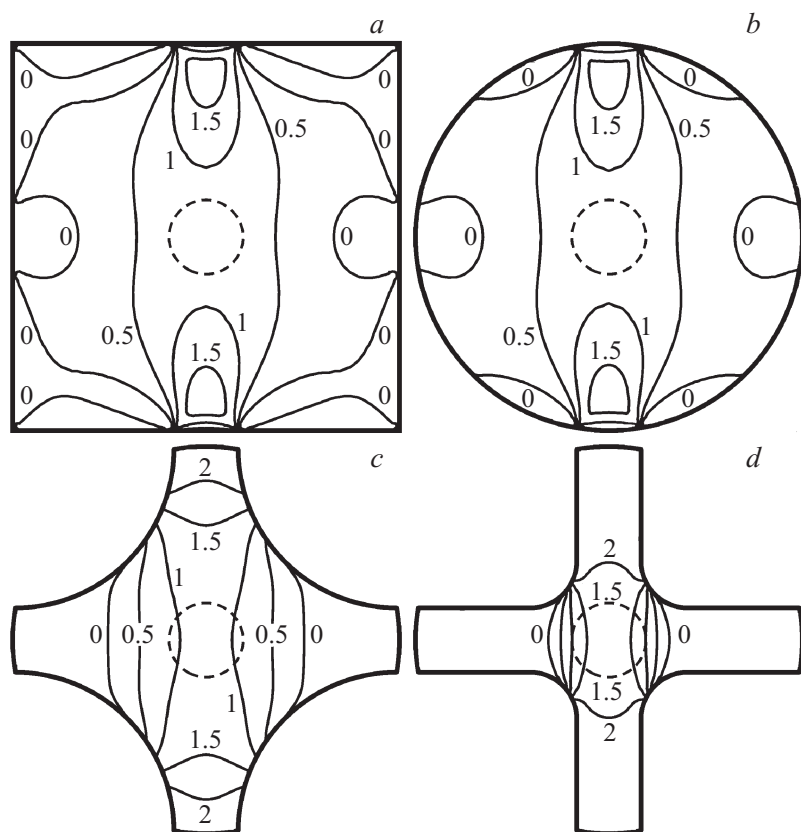


Рис. 2. Изолинии величины разности напряжений $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ (в МПа) для фотоупругих элементов разных форм: квадрат (a), круг (b), крест при $h = 2.55$ mm (c) и при $h = 4.0$ mm (d).

Из рисунка видно, что как для квадратной, так и для круглой формы ФЭ напряжения сконцентрированы на периферии ФЭ, вблизи областей его касания с нагрузочным элементом пьезооптического датчика деформации, в котором закреплен ФЭ, и значительно спадают к центру ФЭ. В то время как световой пучок проходит именно через актуальную область ФЭ, т.е. в области минимальных напряжений. Из рисунка также видно, что при переходе от квадратной к круглой

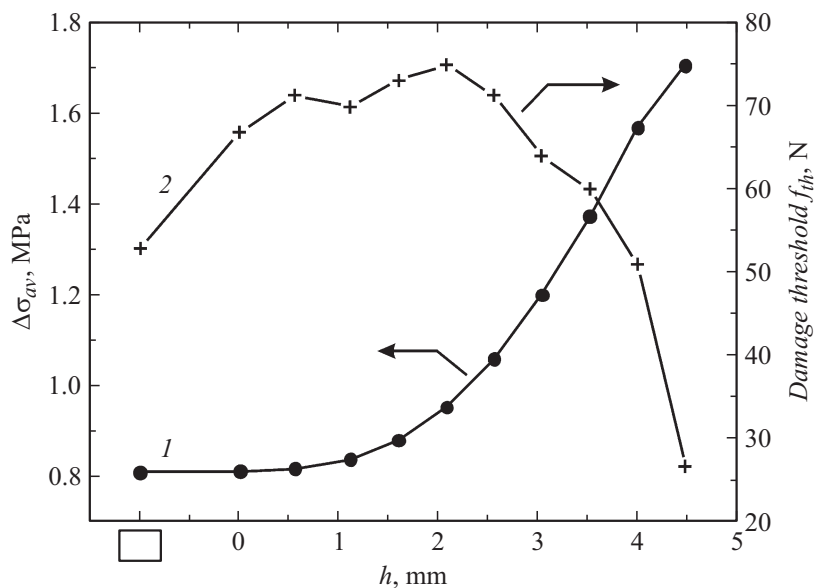


Рис. 3. 1 — зависимость величины разности напряжений $\Delta\sigma_{av}$, усредненной по актуальной области ФЭ, от величины „углубления“ h , 2 — зависимость величины порога разрушения f_{th} от величины „углубления“ h . Значения $\Delta\sigma_{av}$ и f_{th} для квадратной формы фотоупругого элемента показаны квадратом на оси абсцисс. Расчетные точки соединены прямыми линиями для удобства восприятия.

форме ФЭ картина напряжений практически не меняется. При переходе же к крестообразной форме и по мере увеличения „углубления“ h напряжения увеличиваются и перераспределяются ближе к центру ФЭ, т.е. в ту актуальную область, где проходит световой луч. Следует отметить, что перераспределение поля напряжений происходит при одинаковой внешней силе, т.е. только за счет изменения формы ФЭ. На рис. 3 приведена зависимость величины $\Delta\sigma_{av}$ (1) от формы ФЭ и величины „углубления“ h . Величина $\Delta\sigma_{av}$ для квадратной формы ФЭ при приложении внешней силы к площадке 2×4 mm соответствует квадрату на оси абсцисс. При приложении внешней силы однородно ко всему торцу квадратного ФЭ площадью 12×4 mm дает величину $\Delta\sigma_{av}$, вдвое меньшую по сравнению с площадкой 2×4 mm. Таким

образом, приложение однородной нагрузки ко всей поверхности ФЭ не эффективно с точки зрения повышения чувствительности пьезооптического преобразователя. Из рисунка видно, что переход от квадратной к круглой форме ФЭ не дает выигрыша в $\Delta\sigma_{av}$. При значениях „углубления“ h от 0 примерно до 2 mm рост величины $\Delta\sigma_{av}$ также незначителен. Резкое увеличение напряжений в актуальной области начинается с величины h более 2 mm. Таким образом, эффективность крестообразной формы ФЭ начинает сказываться примерно с формы, показанной на рис. 2, *c* ($h = 2.55$ mm). Увеличение напряжений в актуальной области здесь составляет около 38%, а для формы ФЭ, показанной на рис. 2, *d* ($h = 4.0$ mm), напряжения увеличиваются почти вдвое. Примерно на эту же величину растёт и выходной сигнал преобразователя [3].

Однако очевидно, что увеличение „углубления“ будет приводить к снижению механической прочности ФЭ к прилагаемым нагрузкам. Для исследования этой проблемы были проведены численные расчеты порога разрушения ФЭ в зависимости от его формы. Расчеты также проводились методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Величина напряжений, возникающих в ФЭ разных форм, сравнивалась с пределом прочности кварца, равным 51.7 МПа [8]. На рис. 3 (2) показана зависимость величины пороговой силы f_{th} , при которой происходит разрушение ФЭ. Из рисунка видно, что при переходе от квадратной формы ФЭ к круглой порог разрушения увеличивается и продолжает расти даже при увеличении „углубления“ h вплоть до 2 mm. При дальнейшем увеличении h порог разрушения f_{th} начинает уменьшаться. При h , равном примерно 4 mm, порог сравнивается с порогом для квадратной формы и далее начинает резко уменьшаться. Некоторые немонотонности в зависимости $f_{th}(h)$ связаны с качественным изменением формы ФЭ: переход от выпуклых поверхностей к вогнутым и далее с появлением плоских участков на боковых поверхностях ФЭ. Из полученной зависимости можно сделать вывод, что увеличение „углубления“ вплоть до 4 mm (форма ФЭ соответствует рис. 2, *d*) не приводит к снижению прочностных характеристик ФЭ по сравнению с квадратной формой, при этом наблюдается существенный рост напряжений в актуальной области ФЭ.

Таким образом, в работе показано, что использование крестообразной формы ФЭ в пьезооптическом преобразователе позволяет значительно увеличить значение напряжений в актуальной области ФЭ при одном и том же внешнем усилии, тем самым увеличить чувстви-

тельность преобразователя. При этом ФЭ сохраняет свои прочностные характеристики.

Работа выполнена в рамках опытно-конструкторских работ, проводимых ООО „Фирма ПОДИЙ“, г. Москва, генеральный директор А.В. Поярков.

Список литературы

- [1] *Coker E.G., Filon L.N.G.* // A Treatise on Photo-Elasticity. Cambridge: University Press, 1931. 624 p.
- [2] *Frocht M.M.* // Photoelasticity. N.Y.: Wiley-Interscience, 1948. V. 1. 432 p.
- [3] *Fedorinin V.N., Paulish A.G., Levina A.S.* // Optoelectronics in Measurement of Measurement of Physical Magnitudes. N.Y.: Nova Science Publisher, Inc., 2011. 66 p.
- [4] *Слезингер И.И.* // Измерительная техника. 1985. № 11. С. 45.
- [5] *Паулиш А.Г., Поярков А.В., Федоринин В.Н., Шатов В.А., Рафаилович А.С.* Тензометрический преобразователь: Патент РФ № 2422786 // Бюл. изобр. 2011. № 18.
- [6] *Паулиш А.Г., Федоринин В.Н.* Тензометрический датчик (варианты): Патент РФ № 2454642 // Бюл. изобр. 2012. № 18.
- [7] *Бараков В.Н., Маслов О.П., Паулиш А.Г., Поярков А.В.* Фотоупругий элемент: Международная заявка РСТ/RU2014/000767 от 14.10.2014.
- [8] Encyclopedia of Optical Engineering / Ed. by Ronald G. Driggers. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 2003. V. 1. P. 205.