

## ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР СВЕТА

© 2010 г. А. М. Леонов, канд. техн. наук

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

E-mail: alexl@newman.bas-net.by

Предложена новая конструкция пьезокерамического дефлектора оптического излучения, обладающая достоинствами как электромеханических, так и немеханических сканирующих систем. На базе предложенной конструкции дефлектора могут быть разработаны системы массового применения, например лазерные маркеры и устройства трехмерного технического зрения.

**Ключевые слова:** дефлектор света, лазерная сканирующая система, лазерный маркер, устройство трехмерного технического зрения.

Коды OCIS: 230.1150

Поступила в редакцию 16.12.2009

### Введение

Современные дефлекторы света с подвижным якорем обеспечивают необходимые угол отклонения, аперттуру и отсутствие потерь излучения, а акустооптические – быстродействие, но ни те, ни другие не могут выполнить указанные требования одновременно. Это ограничивает возможности применения систем с их использованием.

### Конструкция пьезодефлектора и его элементов

Основными узлами электромеханических дефлекторов всех типов являются (рис. 1): цифроаналоговый преобразователь 1, усилитель 2, электропривод 3, на ось которого установлено зеркало 4, и датчик положения зеркала 5. Известны электроприводы с подвижным якорем [1, 2] и пьезокерамические. Современный пьезокерамический привод содержит биморфный пьезоэлемент из двух пьезопластин и упругий редуктор, преобразующий линейные перемещения конца биморфа в поворот оси [3]. Наиболее эффективен электропривод, содержащий несколько пьезоэлементов (рис. 2) [4]. Биморфные элементы 1–4 этого привода соединены своими концами через упругие элементы 5 с осью 6. Эффективным датчиком положения зеркал является интерферометр с дифракционной решеткой и точностью порядка 1 угл. секунды [5, 6].

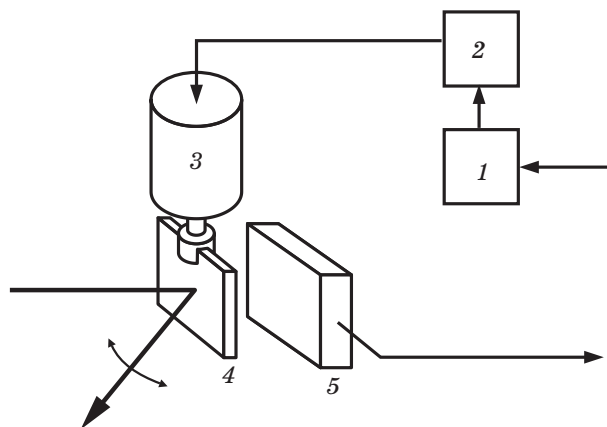


Рис. 1. Функциональная схема электромеханического дефлектора.

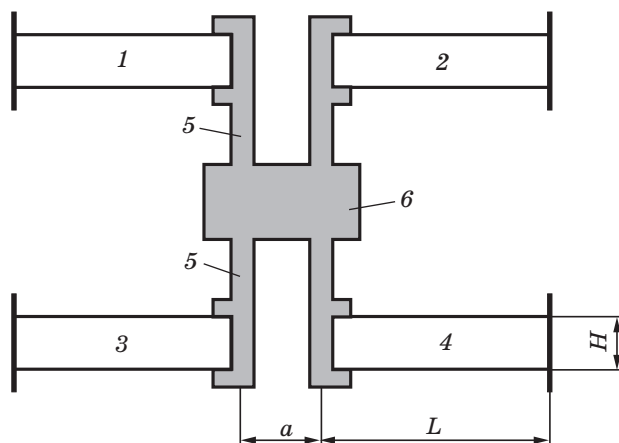


Рис. 2. Конструкция пьезопривода.

## Разрешение сканирования и полоса рабочих частот

Подача управляющего напряжения приводит к изгибу биморфных элементов, повороту зеркала и отклонению оптического луча в пределах угла сканирования:

$$\varphi = 12d_{31}E_{\max}L^2/Na, \quad (1)$$

где  $d_{31}$  и  $E_{\max}$  – пьезомодуль и предельная напряженность электрического поля пьезокерамики,  $H$  и  $L$  – толщина и длина пьезоэлементов,  $a$  – расстояние между упругими элементами.

Разрешение сканирования определяется выражением:

$$N = \varphi A/k\lambda, \quad (2)$$

где  $A$  – апертура зеркала,  $k$  – коэффициент порядка единицы,  $\lambda$  – длина волны излучения. Полоса рабочих частот  $\Delta f$  рассматриваемой конструкции определяется по методике, изложенной в [7, 8]:

$$\Delta f = f_p = (1/2\pi)[G/(I_{\Pi} + I_3)]^{0,5}, \quad (3)$$

где  $f_p$  – частота механического резонанса,  $G$  и  $I_{\Pi}$  – жесткость и эквивалентный момент инерции пьезопривода,  $I_3$  – эквивалентный момент инерции зеркала,

$$G = 0,84(H/L)^3YAL^2, \quad (4)$$

$$I_{\Pi} = 0,47(H/L)\rho_{\Pi}AL^4, \quad (5)$$

$$I_3 = 0,005\rho_3A^5(L/a), \quad (6)$$

$Y$  – модуль Юнга,  $\rho_{\Pi}$  – плотность пьезокерамики,  $\rho_3$  – плотность материала зеркала.

Обеспечение максимума рабочей полосы частот при заданном разрешении сканирования требует выполнения условия:

$$I_{\Pi} = I_3. \quad (7)$$

Оптимальную длину пьезоэлемента можно определить, подставляя в (7) значения (5) и (6):

$$L_{\text{опт}} = 0,32[\rho_3(L/a)^2/\rho_{\Pi}(H/L)]^{0,25}A. \quad (8)$$

Полосу рабочих частот оптимизированного дефлектора определяем, подставляя в (3) значения (4–6) с учетом (8):

$$\Delta f = 0,15(H/L)V_{\text{зв}}/L_{\text{опт}}, \quad (9)$$

где  $V_{\text{зв}} = (Y/\rho_{\Pi})^{0,5}$  – скорость поперечных звуковых волн в пьезокерамике.

Проведем расчет основных параметров нескольких образцов предлагаемой конструкции, сделав следующие допущения.

Рассчитанные параметры предложенной конструкции пьезокерамического дефлектора

№ п/п	A, мм	$L_{\text{опт}}$	$\varphi$ , мрад	N	$\Delta f$ , кГц
1	6,25	4,2	20	130	40
2	12,5	8,4		260	20
3	25	16,8		525	10
4	50	33,5		1050	5

1. Использованные материалы: пластины – пьезокерамика ЦТС-19 с пьезомодулем  $d_{31} = 1,4 \times 10^{-10}$  м/В, предельным электрическим полем  $E_{\max} = 10^6$  В/м, модулем Юнга  $Y = 6 \times 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> и с плотностью  $\rho_{\Pi} = 7,2 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; зеркало – кварц с плотностью  $\rho_3 = 2,2 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Ширина каждого пьезоэлемента  $b(x) = 3A(1 - 0,5x/L)$ , где  $x$  – расстояние от точки крепления.

3.  $H/L = 0,4$ ;  $a/L = 0,2$ ;  $k\lambda = 1$  мкм.

В таблице приведены основные параметры образцов, отличающихся размером зеркала и рассчитанных с использованием приведенных выше формул и допущений.

## Сравнительный анализ дефлекторов света

На рис. 3 приведены зависимости предельного разрешения сканирования  $N$  от полосы частот  $\Delta f$  для дефлекторов с подвижным якорем по данным работы [2] и для пьезодефлекторов по данным таблицы. Сравнение этих зависимостей

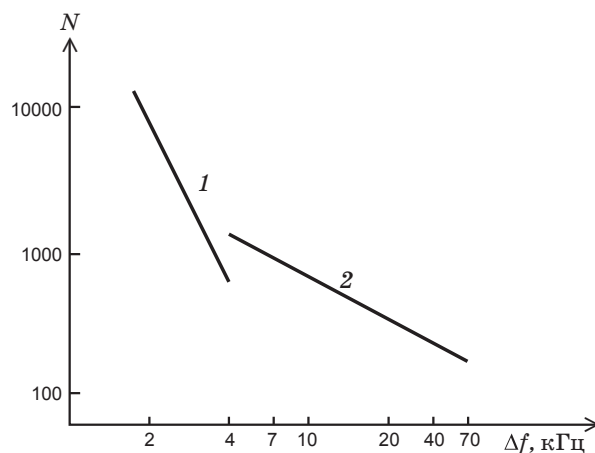


Рис. 3. Зависимость разрешения сканирования  $N$  от полосы рабочих частот  $\Delta f$  для электромагнитных (1) и пьезокерамических (2) дефлекторов.

показывает, что в полосе частот до 3 кГц эффективнее дефлекторы с подвижным якорем, а на более высоких частотах – пьезокерамические.

Акустооптические дефлекторы не уступают пьезокерамическим по разрешению сканирования, существенно превосходя их по полосе рабочих частот (до 100 кГц и более), однако они не находят широкого применения из-за того, что создают значительные потери света, нежелательные для высокоскоростных систем с лазерами высокой мощности.

Пьезокерамические дефлекторы предпочтительнее дефлекторов иных типов в полосе частот 3–20 кГц, а на более высоких частотах их целесообразно применять совместно с акустооптическими дефлекторами. При этом первым по ходу пучка должен быть акустооптический дефлектор, установленный под углом Брэгга, а вторым – пьезокерамический. Такая конструкция имеет приемлемые потери света, а по скорости сканирования она близка к двухкоординатному акустооптическому дефлектору.

### Практическое применение пьезодефлекторов

**Лазерная маркировка.** Современные лазерные маркеры существенно превосходят струйные принтеры по информативности создаваемых изображений и их устойчивости к внешним воздействиям [9, 10]. Однако низкая производительность не позволяет использовать эти устройства в промышленности. Задача разработчиков систем лазерной маркировки массового применения – поднять скорость перемещения луча с нескольких тысяч до десятков тысяч пикселей в секунду и уменьшить время маркировки одного изделия (узла, детали) с нескольких секунд до десятых долей секунды. Очевидно, что столь серьезное улучшение основного параметра нельзя получить методом рационализации. Необходимо использовать новые базовые элементы – дефлекторы света и новый метод развертки излучения.

Возможная конструкция маркера массового применения представлена на рис. 4. Излучение лазера 1 формируется телескопом 2, который согласует пучок с апертурой сканеров 3 и 4. Акустооптический сканер 3 переключает излучение из одной точки записи в другую по одной координате с частотой, определяемой энергетикой процесса записи, а пьезокерамический сканер 4 осуществляет пошаговое перемещение

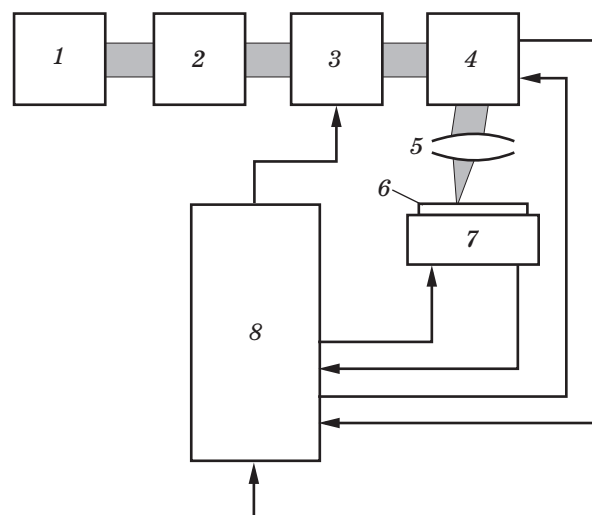


Рис. 4. Устройство лазерной маркировки.

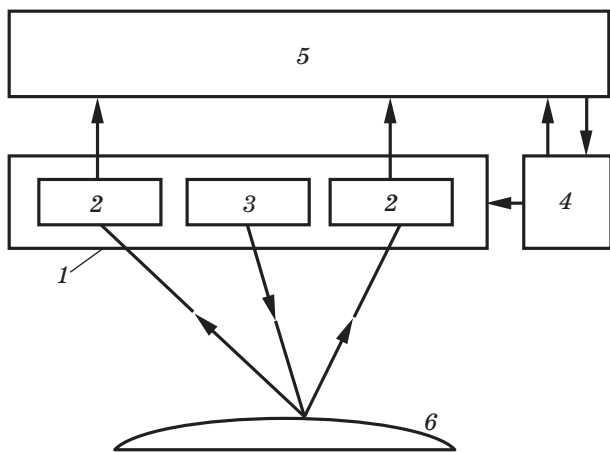
луча по другой координате. Объектив 5 фокусирует лазерный пучок на поверхности маркируемых изделий 6, координатный стол 7 перемещает эти изделия, а компьютер 8 управляет процессом маркировки.

Такой маркер выполняет требования промышленного производства и может быть использован на всех промышленных предприятиях.

**Трехмерное техническое зрение.** Системы технического зрения необходимы практически во всех областях деятельности человека и должны быть еще более массовыми изделиями, чем лазерные маркеры и иметь предельно высокую производительность и технологичность. Основными потребителями таких систем будут производственные, строительные и военные организации [11].

На базе рассмотренного пьезокерамического дефлектора может быть создана перспективная система трехмерного технического зрения, представленная на рис. 5. Основным узлом этой системы является оптико-электронный блок 1, содержащий два цифровых фотоаппарата (кинокамеры) 2 и лазерную сканирующую систему для структурированной подсветки 3. Кроме того, имеется система перемещения (координатный стол, летательный аппарат и т. п.) 4, компьютер 5 и измеряемый объект 6. Единственным узлом, разработка и организация производства которого еще предстоит, является лазерная сканирующая система, аналогичная системе лазерного маркера и не содержащая сложных элементов.

Использование сканирующей системы на базе акустооптического и пьезокерамического деф-



**Рис. 5.** Система трехмерного технического зрения. 1 – оптико-электронный блок, содержащий две цифровые кинокамеры 2, лазерную сканирующую систему 3, систему перемещений 4, компьютер 5, измеряемый объект 6.

лекторов позволит освещать за время экспозиции (сотые доли секунды) несколько тысяч точек измеряемого объекта. Такая скорость сканирования обеспечит производительность трехмерных измерений порядка 100 тысяч точек в секунду. Оптика современных фотоаппаратов позволит измерять промышленные изделия с точностью несколько микрометров, а поверхность Земли и расположенные на ней объекты – с точностью порядка сантиметра.

### Заключение

1. Предложена новая конструкция пьезокерамического дефлектора света, содержащая четыре параллельно расположенных биморфных пьезоэлемента, соединенных своими концами через упругие элементы с осью, на которой установлено зеркало, управляющее оптическим лучом.

2. Данное устройство позволяет расширить возможности пьезокерамических дефлекторов, получив углы сканирования 1–5 градусов, разрешение сканирования до 1000 элементов и более, полосу рабочих частот до нескольких десятков кГц.

3. Рассмотренный дефлектор имеет преимущества перед конкурентами с полосой рабочих частот 3–20 кГц. Электромеханические дефлекторы других типов (с подвижным якорем) не

могут работать в этой полосе частот, а акустооптические создают неприемлемые потери света.

4. Перспективна система, состоящая из акустооптического и пьезокерамического дефлекторов. Ее возможности практически совпадают с возможностями двухкоординатного акустооптического аналога, а потери света в несколько раз меньше, чем у двухкоординатного.

5. Разработка и серийное производство рассмотренного дефлектора света поможет решить проблему создания новых лазерных систем массового применения, например лазерных маркеров и систем трехмерного технического зрения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Brosens P.J. Scanning speed and accuracy of moving magnet optical scanners // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 1. P. 200–206.
2. Ларченко Ю.В., Леонов А.М., Жук С.М. Современные сканирующие системы на основе электро-механических дефлекторов света // Лазер-Информ. 2003. № 9–10. С. 8–12.
3. Тевяшов В.И., Шушарин С.Н. Оптические дефлекторы для современных тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 12–16.
4. Кравцов А.А., Леонов А.М. Дефлектор света // Патент Беларуси № 5807. 2009.
5. Ероховец В.К., Ларченко Ю.В., Леонов А.М. Сканирующий интерферометр // А. с. СССР № 1733920. 1992. Бюл. № 18.
6. Kukonin A., Leonov A., Larchenko Y. Interferometrical scanning beam control system for electromechanical deflectors // SPIE'S OE. Los Angeles. CA. USA. 1994. V. 2120. P. 218–224.
7. Erochovets V., Larchenko Y., Leonov A. The speed of on X–Y Piezoceramic light deflector // Telecommunications & radio engineering. 1992. № 6. P. 133–136.
8. Широков А.М., Леонов А.М., Шуляк В.В. Оптимизация пьезокерамического дефлектора света // Доклады АН БССР. 1984. Т. 18. № 8. С. 709–712.
9. Данилов Д. Порядок – двигатель торговли. Современные технологии маркировки продукции // Пакет. М.: Курсив. 2005. № 1. С. 36–43.
10. Боргольц Ж.-Ф., Рено Р. Система и способ для обработки объектов с использованием лазера // Патент РФ № 2 322 334. 2008.
11. Кравцов А.А., Леонов А.М. Трехмерное дистанционное зондирование Земли // Материалы четвертого Белорусского космического конгресса. Минск. 2009. Т. 2. С. 43–46.