

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

© 2007 г. Д. В. Чесноков, канд. техн. наук

Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск

E-mail: garlic@yandex.ru

Обсуждаются принципы функционирования и достижимые параметры микромеханических многоэлементных зеркал, пригодных для динамического непрерывного управления положением оптических лучей в пространстве и использующих для этого магнитные поля.

Коды OCIS: 230.3990, 230.0250, 350.6090.

Поступила в редакцию 22.08.2006.

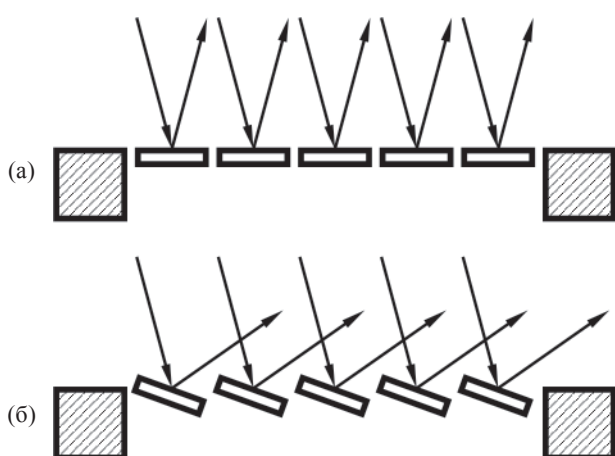
Оптико-механические методы сканирования давно и широко применяются в различных оптических приборах [1–3]. Серьезной проблемой является необходимость уменьшения габаритов, энергопотребления, увеличения быстродействия и улучшения разрешающей способности устройств управления световым лучом. Работы в этой области ведутся в том числе с использованием принципов микромеханики [4]. В частности, в [5] описана одна из первых отечественных разработок в этой области – микромеханический модулятор света с магнитоэлектрическим управлением положением микрошторок, изготовленный по кремниевой интегральной технологии.

В настоящей работе предлагаются и анализируются принципы создания быстродействующего микромеханического дефлектора, содержащего одномерную матрицу кремниевых узких зеркальных полосок, совершающих крутильные колебания вок-

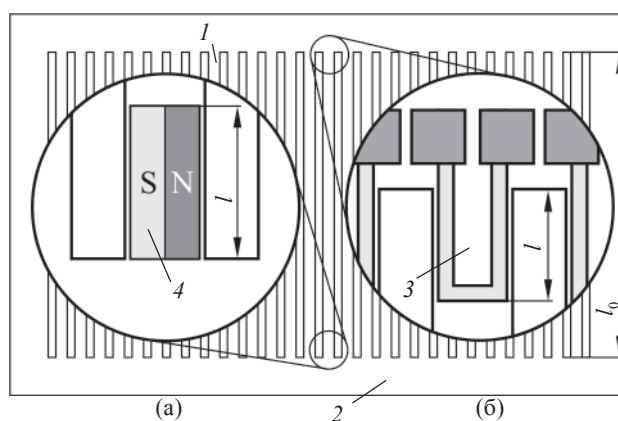
руг своей продольной оси. При этом матрица должна быть помещена в магнитное поле.

Полоски образуют составное зеркало, каждый сегмент зеркала имеет индивидуальный “движитель” – фотолитографически сформированный проволочный виток, через который пропускается переменный ток, или нанесенный микромагнит. В последнем случае переменным должно быть внешнее магнитное поле. На рис. 1 приведена принципиальная схема работы дефлектора, на рис. 2 – возможные варианты его конструкции.

Для изготовления подобных дефлекторов может быть использована кремниевая планарная технология. Свободные полоски заданной толщины получают с помощью известной методики химического травления кремниевой пластины, легированной в поверхностном слое бором до концентрации порядка  $10^{22} \text{ см}^{-3}$ , что предотвращает растворение легированного слоя в избирательных травителях



**Рис. 1.** Схема работы дефлектора. На поперечном сечении одномерной матрицы микрозеркал показано их положение до (а) и после (б) синхронного поворота под действием вращающего момента. Также показан ход падающих на матрицу и отраженных от нее световых лучей.



**Рис. 2.** Микромеханический дефлектор, представляющий собой матрицу микрозеркал (полоски 1) закреплена концами в раме 2), центральная часть которых свободна от элементов конструкции, создающих вращающий момент – токовых петель 3 (б) или постоянных магнитов 4 (а).

кремния. Рамка с током изготавливается гальваническим наращиванием золота по рисунку, заданному фотолитографически. Микромагниты получают напылением в вакууме через маску соответствующего магнитотвердого сплава.

Крутящий момент  $M_{кр}$ , вынуждающий полоску микрозеркала поворачиваться, возникает вследствие взаимодействия магнитного момента витка или микромагнита с внешним магнитным полем:

$$M_{кр} = P_m B \cos \alpha \cos \omega t. \quad (1)$$

Здесь  $P_m$  – магнитный момент, равный  $P_{m,1} = iS$  в случае витка и  $P_{m,2} = I_r V$  – в случае микромагнита ( $i$  – ток по витку,  $S$  – площадь витка с током,  $I_r$  – намагниченность,  $V$  – объем микромагнита);  $B$  – индукция внешнего магнитного поля,  $\alpha$  – угол между направлением магнитного момента  $P_m$  и направлением внешнего магнитного поля,  $\omega$  – частота крутильного момента,  $t$  – текущее время.

Выражение (1) удобно представить в виде  $M_{кр} = M_0 \cos \omega t$ , где

$$M_0 = P_m B \cos \alpha. \quad (2)$$

Наибольшая скорость поворота микрозеркала достигается в случае формирования в его полоске упругой стоячей волны (рис. 3), при этом вдоль полоски располагается половина длины упругой крутильной волны  $\lambda/2$ .

Скорость  $v$  упругой крутильной волны в полоске прямоугольного сечения толщиной  $b$  и шириной  $h \gg b$  определяется выражением [7]

$$v = \frac{2b}{h} \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\rho$  – плотность материала полоски.

При возбуждении крутильной волны в полоске вследствие отражений волны от закрепленных концов при резонансе (т. е. когда частота возбуждения обеспечивает равенство длины полоски половине длины волны) возникает пространственное распределение амплитуд углов поворота поперечных сечений полоски, определяемое бесконечным числом мод крутильных колебаний [6]

$$\varphi(Z) = \sum_v \varphi_v(Z),$$

где  $v = 1, 2, 3, \dots$  – целые числа, которыми обозначаются моды колебаний в полоске;  $\varphi_v(Z)$  – распределение амплитуд углов поворота поперечных сечений полоски вдоль продольной оси полоски для моды с номером  $v$ .

В работе [6] для  $\varphi_v(Z)$  получены следующие выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(Z) = \frac{4QM_0 \sin \frac{2\pi l}{\lambda_1} \sin \frac{2\pi Z}{\lambda_1}}{\rho I_k \lambda_1 \omega_1^2} \quad \text{при } v = 1, \\ \varphi_v(Z) = \frac{4QM_0 \sin \frac{2\pi v l}{\lambda_1} \sin \frac{2\pi v Z}{\lambda_1}}{\rho I_k \lambda_1 (\omega_v^2 - \omega_1^2)} \quad \text{при } v \neq 1, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $Q$  – добротность колебательной системы (полоски микрозеркала),  $l$  – расстояние от конца полоски до точки приложения крутящего момента  $M_{кр}$ ,  $I_k \approx hb^3/3$  – крутильный момент инерции сечения полоски относительно продольной оси полоски [8],  $\omega_1$  – частота возбуждения при резонансе основной моды;  $\omega_v = v\omega_1$  – частота гармоник основной моды.

Форма средней части волновода, выполняющей функцию микрозеркала дефлектора, определяется в основном первой, второй и третьей модами колебаний.

Расположение крутящих моментов симметрично относительно середины полоски позволяет, как показано в [6], подавить колебание на второй ( $v = 2$ ) гармонике.

Схематическое изображение распределения амплитуд  $\varphi_v(Z)$  поворота сечений волновода на первой и третьей гармониках, описываемое выражениями (3), и результат  $\varphi_1(Z) + \varphi_3(Z)$  их суперпозиции показаны на рис. 4.

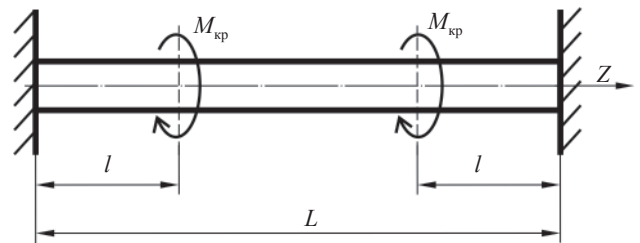


Рис. 3. Схема приложения крутящих моментов, возбуждающих в полоске крутильную стоячую волну на основной моде колебаний.

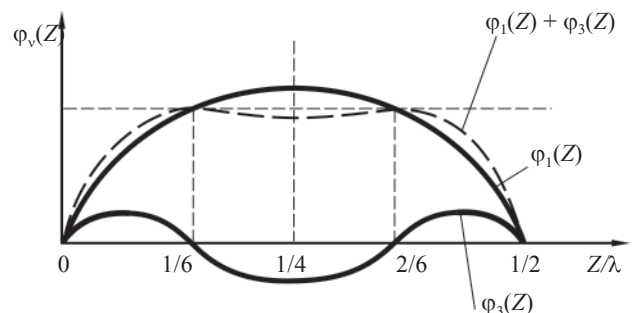


Рис. 4. Распределение вдоль полоски амплитуд крутильных колебаний на основной моде и третьей гармонике.

Колебания полосы на всех модах совершаются с частотой  $\omega$  вынуждающего кручение момента, т. е. синхронно; это означает, что реальное распределение амплитуды крутильных колебаний вдоль полосы микрзеркала является суперпозицией распределений амплитуд отдельных мод колебаний. Из рис. 4 можно увидеть, что наложение двух видов колебаний приводит к некоторой линейризации зависимости амплитуды от координаты  $Z$ . В средней части полосы (между координатами  $Z/\lambda_1 = 1/6$  и  $Z/\lambda_1 = 2/6$ ) условием наилучшей линейризации можно считать равенство амплитуды третьей гармоники в точке с координатой  $Z/\lambda_1 = 1/4$  превышению амплитуды основной гармоники в этой же точке над амплитудами в точках на краях средней части (т. е. при  $Z/\lambda_1 = 1/6$  и  $Z/\lambda_1 = 2/6$ ):

$$\varphi_3(Z/\lambda_1 = 1/4) = \varphi_1(Z/\lambda_1 = 1/4) - \varphi_1(Z/\lambda_1 = 1/6).$$

Подставив сюда соответствующие значения из (3), после элементарных преобразований получим

$$3 - 4 \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) = 8(1 - \sin \pi/3), \quad (4)$$

откуда  $\sin^2(2\pi/\lambda_1) = 0,482$ ,  $2\pi/\lambda_1 = 0,767$  и  $l/\lambda_1 = 0,122$ . Это означает, что наилучшая линейризация средней части полосы микрзеркала должна наблюдаться при приложении крутящего момента в точках с координатами  $Z_1 = l = 0,122\lambda_1$  и  $Z_2 = 0,5\lambda_1 - l = 0,378\lambda_1$ .

Найдем, используя (3), (4), амплитуду крутильных колебаний при  $Z = \lambda/4$  в условиях суперпозиции основного колебания и третьей гармоники и при возбуждении колебаний двумя вращательными моментами  $M_0$ , как на рис. 3:

$$\begin{aligned} \varphi\left(Z = \frac{\lambda_1}{4}\right) &= \varphi_1(Z) + \varphi_3(Z) = \\ &= \frac{8QM_0}{\rho I_\kappa \lambda_1 \omega_1^2} \left[ \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) - \frac{1}{8} \sin\left(\frac{6\pi l}{\lambda_1}\right) \right] = \frac{4,8QM_0}{\rho I_\kappa \lambda_1 \omega_1^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для кремниевых микрзеркал в виде полосок шириной  $h = 50$  мкм, толщиной  $b = 2$  мкм, длиной  $L = \lambda_1/2 = 5$  мм (для кремния  $G = 10^{11}$  Па,  $\rho = 2,32 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) круговая частота возбуждения основной гармоники  $\omega_1 = 3,3 \times 10^5$  с<sup>-1</sup>. Если задаться приемлемым на практике значением амплитуды угла поворота  $\pm 5,7^\circ$  [ $\varphi(Z = \lambda/4) = 0,1$  рад], можно, используя (5), найти значение  $QM_0 \approx 5 \times 10^{-9}$  Н м.

При работе дефлектора в статике, например, в стартстопном режиме зеркало должно, отклонившись, оставаться неподвижным. При этом угол  $\varphi_{ст}$  его отклонения зависит от крутящего момента  $M_0$  следующим образом [8]:

$$\varphi_{ст} = \frac{M_0 l}{GI_\kappa}.$$

При этом средняя часть полосы микрзеркала между двумя приложенными к полоске моментами  $M_0$  (рис. 3) является примерно плоской и отклоненной от первоначального положения на угол  $\varphi_{ст}$ . Вблизи мест приложения  $M_0$  некоторая неплоскость будет иметь место, так как здесь совершается переход от закрученного состояния полосы в области длиной  $l$  к плоскому. Задавшись значениями угла  $\varphi_{ст} = 0,1$  рад и  $l = 1,2$  мм, получим для параметров кремниевых микрзеркал, приведенных выше, значение  $M_0 = 8,3 \times 10^{-10}$  Н м.

Следует отметить нелинейную зависимость угла отклонения зеркала от значения магнитного момента  $P_M$  микровитка или микромагнита, так как, во-первых, в соответствии с выражением (1) крутящий момент изменяется с изменением угла  $\alpha$  между направлением магнитного момента и направлением внешнего магнитного поля при поворотах полотна микрзеркала в области приложения крутящего момента и, во-вторых, при закручивании полосы из-за ее деформации возникает продольная сила, натягивающая полосу и увеличивающая ее жесткость. При малых углах отклонения этими эффектами можно пренебречь.

В стартстопном режиме для форсированного перевода микрзеркала из одного углового положения в другое необходимо прикладывать магнитные моменты, определяемые уравнением (5). Время перевода  $t_{пер}$  можно оценить как длительность четверти периода  $T$  собственных колебаний микрзеркала:  $t_{пер} = T/4 = \pi/2\omega_1$ . Для приведенных выше геометрических параметров микрзеркал  $t_{пер} \approx 4,8 \times 10^{-6}$  с.

В таблице приведены расчетные параметры магнитных движителей, обеспечивающих для рассматриваемых в тексте микрзеркал повороты на угол  $\varphi \approx 0,1$  рад. Принято значение механической добротности микрзеркала  $Q = 10$ .

Рассмотрим особенности оптических характеристик дефлектора с составным зеркалом, обусловленные дискретным характером структуры его отражающей поверхности и строго периодическим расположением микрзеркал, образующих эту поверхность.

Составное зеркало обладает свойствами отражательной дифракционной решетки, постоянная  $d$  которой равна шагу расположения микрзеркал. При нормальном падении на нее монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda_{св}$  направление дифрагированных лучей (главных максимумов) определяется основным уравнением дифракционной решетки:

$$d \sin \gamma = \pm m \lambda_{св},$$

где  $\gamma$  – угол между направлением нормального падения и направлением луча,  $m = 0, 1, 2, \dots$  – целые

Расчетные параметры магнитных движителей

Режим	Тип движителя	Внешнее поле $B$ , Тл	Крутильный момент $M_0$ , Н·м	Размер рамки, $l_0 \times h$ , мм	Ток рамки, $A$	Размер микромагнита, $l_0 \times h \times d$ , мм	$B_{ост}$ , Тл	$P_m$ , А·м <sup>2</sup>
Стоячая волна	Рамка с током	0,5	$5 \times 10^{-10}$	$1 \times 0,05$	0,02	—	—	$10 \times 10^{-8}$
	Микромагнит	0,5	$5 \times 10^{-10}$	—	—	$1 \times 0,05 \times 0,001$	0,025	$10 \times 10^{-8}$
Стартстопный	Рамка с током	0,5	$8,3 \times 10^{-10}$	$1 \times 0,05$	0,03	—	—	$15 \times 10^{-8}$
	Микромагнит	0,5	$8,3 \times 10^{-10}$	—	—	$1 \times 0,05 \times 0,001$	0,038	$15 \times 10^{-8}$

числа, определяющие номер дифракционного максимума, причем поскольку в дефлекторе ширина зазора между шторками мала по сравнению с шириной их полотна  $h$ , то  $d \approx h$  и

$$m_{\max} = \frac{2d}{\lambda_{\text{св}}} \approx \frac{2h}{\lambda_{\text{св}}} \quad (6)$$

При поворотах микрозеркал положение лучей в пространстве не изменяется, однако изменяется их интенсивность – энергия падающего светового монохроматического пучка при синхронных поворотах микрозеркал перетекает последовательно от одного луча к другому, вызывая соответствующее перемещение нулевого максимума.

На практике дефлектор часто используют, направляя лучи в ограниченное угловое пространство  $2\Delta\theta$ . В таком случае выражение можно преобразовать к виду

$$m' \approx \frac{2d}{\lambda_{\text{св}}} \sin(\Delta\theta), \quad (7)$$

где  $m'$  – число позиций луча в угловом пространстве  $2\Delta\theta$ . Так, если  $\Delta\theta = 0,1$  рад,  $\lambda_{\text{св}} = 0,5$  мкм,  $d \approx 250$  мкм, то  $m' = 100$ .

Необходимо отметить, что положения отклоненного луча не зависят от углов поворота микрозеркал дефлектора, его угловые координаты в каждой позиции определяются только конструктивными параметрами дефлектора, т. е. могут быть известны с высокой точностью.

Приведенные выше расчетные данные говорят о перспективности применения разрабатываемого прибора в различных системах оптоэлектроники. Так, возможно создание сканирующего проектора с телевизионным стандартом развертки и разрешением  $1000 \times 1000$  элементов и более, лазерных ло-

кационных систем со скоростью перемещения луча  $5 \times 10^3$  рад/с и более при уникально малых массогабаритных характеристиках (как у микросхемы) и сверхмалом потреблении энергии, коммутаторов оптоволоконных линий связи с произвольным переключением до 100 каналов и временем переключения 1,0–10,0 мкс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по инфракрасной технике / Ред. И. Вольф, Г. Цисис. В 4-х томах. Т. 2. Проектирование оптических систем. М.: Мир, 1998. 608 с.
2. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л: Машиностроение, 1983. 696 с.
4. Акульшин Ю.Д., Еськов Д.Н., Парфенов В.А., Пятыйшев Е.Н. Микроэлектромеханические системы: новые возможности оптико-электронной аппаратуры космического базирования // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 11. С. 65–71.
5. Чесноков В.В. Микромеханический модулятор света // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1990. № 6. С. 82.
6. Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Возбуждение крутильных волн в микромеханическом упругом волноводе // Труды Междунар. научн. конгресса “ГЕО-Сибирь-2006”. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Новосибирск: СГГА, 2006. С. 136–143.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 250 с.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 694 с.