

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77, 621.319.1

НИЗКОВОЛЬТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ПОЛЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Э. Г. Косцов, В. С. Соболев

*Учреждение Российской академии наук
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Описывается новый элемент управляемой полем дифракционной решётки (Grating Light Valve™ diffractive MOEMS device — GLV), который отличается от известных подобных элементов физическим принципом работы и конструкцией, а также значительно более низким управляющим напряжением, отсутствием гистерезиса и возможностью работы в аналоговом режиме. Представлены экспериментальные характеристики элемента GLV.

Ключевые слова: микроэлектроника, микроэлектромеханика, микрооптоэлектромеханика, микрооптика, дифракционная решётка, электростатика.

Введение. В настоящее время современные электронные средства передачи информации обеспечивают скорость обмена до 2,5 Гбит/с на порт при возможности создания до 512 портов. Однако электронные каналы становятся всё более ограничивающим фактором в крупных системах передачи информации, прежде всего в системах телекоммуникации.

Развитие оптических технологий даёт возможность повысить скорость передачи информации. Это обусловлено более широкой полосой пропускания оптических каналов связи, их устойчивостью к воздействию электромагнитных помех при передаче визуальной информации. В то же время современная техника работы с оптическими системами передачи потоков данных недостаточно развита.

Один из путей значительного увеличения скорости передачи массивов информации (вероятно, единственным) — использование микрооптоэлектромеханических устройств (MOEMS), которые уже являются четвёртыми по объёму коммерческой продукции микроэлектромеханических систем (MEMS) — наиболее интенсивно развивающегося сектора современной микроэлектроники [1–9].

Функционирование MOEMS базируется на комбинации двух микротехнологий — MEMS и микрооптика. MOEMS дают возможность построения полностью оптических телекоммуникационных сетей, управляя оптическим сигналом без необходимости преобразования оптический сигнал — электрический сигнал — оптический сигнал.

Типичная конструкция современных MOEMS (как правило, гибридная и корпусируемая) состоит из матрицы микрозеркал с высоким оптическим качеством поверхности, каждое из которых имеет одну или две оси вращения. Управление их положением (позиционированием, наклоном) осуществляется с помощью микроактюаторов и микропроцессора, размещённых в одном корпусе. Микрозеркала выполняют функции параллельных коммутаторов входных оптических каналов (лучей) по плоскости, соединяя в любой комбинации определённые пары элементов (входные и выходные) в аналоговом или цифровом режимах (DMD — digital micro-mirror device). Такая конструкция требует исключительно высокой точности поддержания позиции каждого микрозеркала и возможности её сохранения в течение длительного времени. Среди различных физических принципов, лежащих в основе

работы микроактюаторов, определяющих перемещение подвижных элементов МОEMS, в большинстве конструкций используются электростатические как наиболее технологичные и воспроизводимые. Развитие указанной оптической технологии позволяет значительно повысить скорость передачи потоков информации. По прогнозу экспертов крупномасштабная коммерциализация МОEMS в индустрии телекоммуникаций произойдет в ближайшие 3–5 лет. Одним из препятствий этому пока является невысокое их быстродействие: время переключения МОEMS-коммутатора 1–10 мс при угле поворота микрзеркала не более $5\text{--}10^\circ$.

Принцип функционирования элемента динамической дифракционной решётки. Последние несколько лет разрабатываются принципиально новые оптические микроэлектромеханические системы, основанные на управляемом полем дифракционных решётках (Grating Light ValveTM diffractive MOEMS device (GLV)) [10–16]. Такие системы имеют уникальные параметры, значительно превосходящие МОEMS, которые базируются на движении (вращении вокруг оси) микрзеркал.

Основным элементом GLV является тонкая микробалка (подвижный электрод шириной W_1 с высокой отражательной способностью поверхности), которая смещается под действием сил электростатики. Зазор между микробалкой и противоположным электродом не превышает четверти длины волны модулируемого света. Устройство GLV состоит из множества микробалок, при их прогибе δ в определённой последовательности имеет место дифракция света (рис. 1). Когда к устройству не прикладывается напряжение, то свет отражается от «гладкой» поверхности совокупности микробалок, как от обычного плоского зеркала. Несколько микробалок образуют элемент изображения.

Преимущества таких микрооптических устройств по сравнению с микрзеркальными устройствами определяются их исключительно малой массой (менее 10^{-10} г), перемещаемой под действием сигнала (напряжения). Вследствие небольших амплитуд перемещения микробалки (0,05–0,30 мкм) время её переключения из одного состояния в другое находится в пределах 10–100 нс, что на 2–3 порядка быстрее известных пространственных модуляторов света. С увеличением числа элементов имеет место многократное суммирование световых потоков от каждого из элементов. Величина контраста растёт, достигая значения 1000 : 1 и выше. При расстоянии между элементами W_2 в диапазоне 0,35–1,00 мкм (соответствующем современным проектным нормам МНОП-технологии) дифракционная эффективность достигает значений 75–90 %.

В конструкциях GLV в качестве источника света эффективно использование твердотельных лазеров, точнее их множества, расположенных в линию, с возможностью объеди-

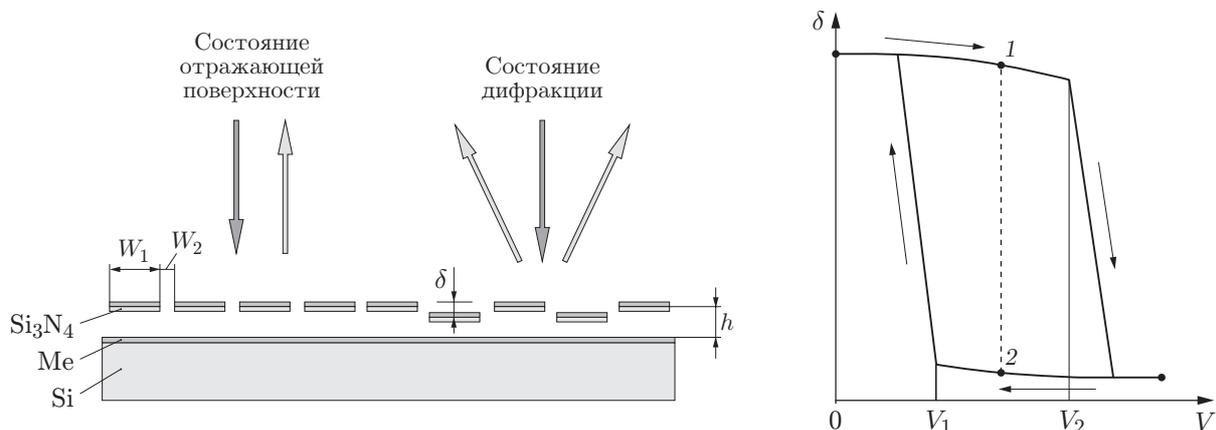


Рис. 1. Схематическое изображение устройства для динамической дифракции света

нения для формирования мощного пучка света.

Типичная структура базового элемента GLV: Si—SiO₂—W—воздушный зазор—микробалка (подвижный элемент Si₃N₄ + Al) с оптимальными размерами: длина 30–500 мкм, ширина 2–5 мкм, толщина 0,3–1,0 мкм. Толщины указанных плёнок: 500 нм (SiO₂), 100 нм (W), 130–150 нм (воздушный зазор), 0,1–0,3 мкм (Si₃N₄), 50 нм (Al), последняя выполняет функции оптического отражателя и проводника.

Воздушный зазор между подвижным и неподвижным электродами создаётся предварительным осаждением на поверхность неподвижного электрода тонкого жертвенного слоя, например алюминия, который позже вытравливается. Эта операция является определяющей, поскольку именно она задаёт параметры дифракции света и их воспроизводимость от элемента к элементу. Толщина такого зазора определяет спектральную область работоспособности прибора, для видимой части спектра она составляет 100–500 нм. При этом в известных конструкциях GLV жертвенный слой не удаляется полностью как для обеспечения защиты поверхности электрода от окисления при последующих высокотемпературных технологических операциях, так и для предотвращения пробоя воздушного зазора. Недостаток указанной конструкции GLV состоит в том, что подаваемое на каждый элемент напряжение распределяется между воздушным зазором и плёнкой Si₃N₄ и импульсное напряжение, которое необходимо прикладывать к микробалке, становится достаточно высоким: до 10–15 В.

Высокая упругость плёнки Si₃N₄, малая амплитуда её прогиба и малая масса определяют очень быстрое перемещение микробалки в исходное состояние — десятки наносекунд. Однако накапливаемый в Si₃N₄ заряд приводит к гистерезису на кривой величина прогиба—напряжение, который может достигать 30 % от поданного напряжения. Переключение микробалки в состояние «включено» требует приложения некоторого напряжения V_2 , и далее микробалка остаётся в этом состоянии, пока напряжение не уменьшится до значения V_1 (см. рис. 1, фрагмент). Петля гистерезиса определяется накоплением и сохранением заряда в плёнке Si₃N₄ в момент контакта Si₃N₄—W.

Эти факторы накладывают ряд ограничений на параметры устройств GLV. В частности, элементы GLV, имея всего два фиксированных состояния, не могут функционировать в аналоговых режимах, что для задач, связанных с обработкой изображений, исключительно важно. Кроме того, накопление заряда в Si₃N₄ при воздействии каждого импульса напряжения требует использования знакопеременных импульсов, что значительно усложняет управление устройствами. Несмотря на это GLV MEMS-устройства уже в течение нескольких лет используется для высокоэффективной работы с изображениями.

Указанные устройства высокотехнологичны, отличаются низкой стоимостью и воспроизводимостью параметров, минимальной чувствительностью к вибрациям, влажности и воздействию радиации. Они легко меняют разрешающую способность и форматы изображения, при этом линейка GLV и электронный блок управления могут размещаться на одном кристалле. Предварительные исследования указанных элементов показали, что они отличаются высокой надёжностью, допускают до 10¹⁴ циклов изгиба без заметных отклонений в параметрах.

Целью данной работы является создание принципиально нового элемента GLV, отличающегося от ранее описанных подобных элементов значительно более низким управляющим напряжением, отсутствием гистерезиса, возможностью функционирования в аналоговом режиме, и исследование его параметров.

Конструкция и принцип функционирования нового элемента. Элемент состоит из подложки (кремний или сапфир), электрода (ITO), тонкой сегнетоэлектрической плёнки толщиной d с высоким значением диэлектрической проницаемости ε (более 1000–3000), управляемого полем воздушного зазора d_3 , подвижного электрода, отражающего

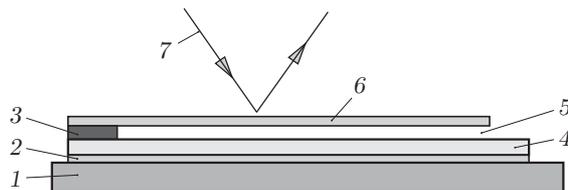


Рис. 2. Конструкция элемента GLV: 1 — подложка из кремния, 2 — электрод ИТО, 3 — диэлектрическая плёнка, 4 — плёнка NBS, 5 — управляемый полем воздушный зазор, 6 — подвижный электрод, 7 — световой поток

свет (рис. 2). Подвижный электрод — свободная тонкая плёнка бериллиевой бронзы толщиной d_2 (1,0–1,5 мкм) — накладывается на поверхность сегнетоэлектрической плёнки; их разделяет зазор, первоначальная величина d_0 которого составляет 1–3 мкм в зависимости от технологии изготовления, степени шероховатости поверхности.

В качестве сегнетоэлектрика использовалась тонкая плёнка ниобата бария-стронция (NBS), модифицированного лантаном $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Nb_2O_6 + 1\% La$. Толщины плёнок ИТО и NBS составляли 0,1–0,5 мкм и 0,3–1,0 мкм соответственно. Технология их получения и основные их электрофизические свойства описаны в [17].

С увеличением прикладываемого напряжения смещения $V_{см}$ между подвижным и неподвижным электродами величина d_3 уменьшается (рис. 3).

Экспериментально значение d_3 определялось исходя из измерений величины ёмкости указанной структуры $C_{общ}$ как двух последовательно включённых ёмкостей — сегнетоэлектрика C_c и воздушного зазора C_3 : $C_{общ} = C_c C_3 / (C_c + C_3)$, где $C_c = \epsilon_0 \epsilon S / d$, $C_3 = \epsilon_0 S / d_3$ (S — площадь подвижного электрода).

Для каждого образца указанных структур величина d_3 однозначно зависит от амплитуды прикладываемого постоянного напряжения, при этом имеет место отсутствие гистерезиса. При подаче на структуру дополнительного короткого импульса напряжения V_p происходит аддитивное сложение двух напряжений и подвижный электрод за время действия импульса смещается в сторону подложки на расстояние δ , определяемое амплитудой V_p , равной 1–3 В (рис. 4). Величина δ достаточно точно определяется из измерений значения $C_{общ}$.

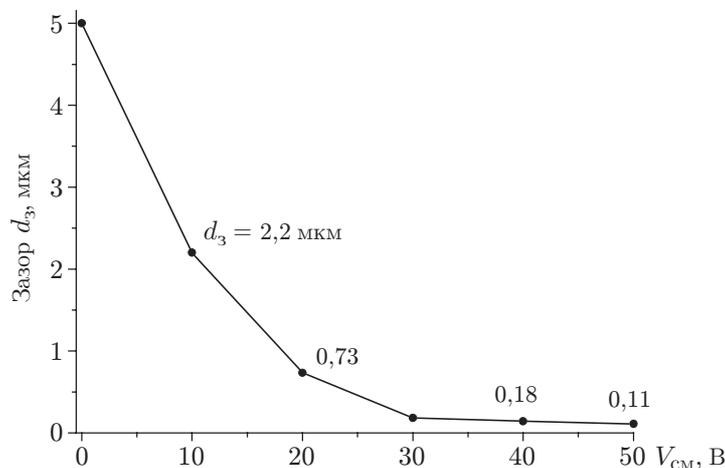


Рис. 3. Изменение величины воздушного зазора d_3 в зависимости от прикладываемого к структуре $V_{см}$, $d = 0,6$ мкм

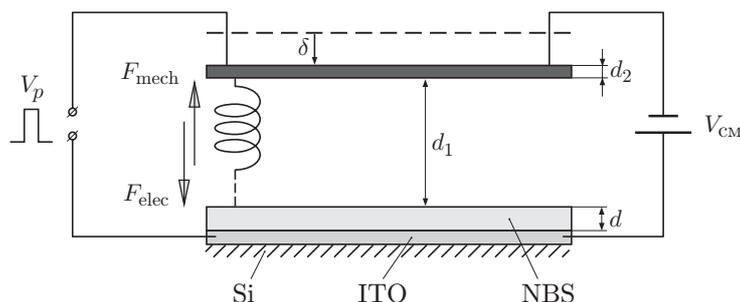


Рис. 4. Схема элемента GLV и принцип его функционирования

На подвижный электрод действуют две противоположно направленные силы: сила электростатики в зазоре F_{elec} , создаваемая поданным на образец напряжением, и механическая сила F_{mech} , обусловленная тем, что при электростатическом прижатии свободной тонкой металлической плёнки к поверхности сегнетоэлектрика значительная часть накапливаемой в структуре энергии (до 10^{-3} – 10^{-2} Дж/м², или 1–5 % от энергии электростатического поля) расходуется на упругую механическую деформацию плёнки металла, которая «натягивается», как мембрана, на отдельные микровыступы поверхности сегнетоэлектрика (их высота 100–500 нм). При этом в силу того, что толщина металлической плёнки значительно превышает размеры микровыступов, зеркальность её поверхности сохраняется. Параметры шероховатости поверхности сегнетоэлектрической плёнки (число и высота микровыступов) определяются технологией её изготовления и толщиной. После снятия импульса напряжения механическая энергия, освобождаясь, определяет высокую скорость отрыва металлической плёнки (её масса составляет 10^{-9} – 10^{-10} г) от поверхности сегнетоэлектрика за время 50–200 нс.

В [18, 19] показано, что размещение подвижного электрода вблизи поверхности диэлектрика с большой величиной диэлектрической проницаемости, когда $\epsilon/d > 10^9$, и высокой электрической прочностью даёт возможность создания в зазоре высокой напряжённости электрического поля и соответственно большой силы, действующей на подвижный электрод.

При подаче на образец постоянного напряжения смещения V_{cm} подвижный электрод под действием электростатических сил жёстко связывается с поверхностью сегнетоэлектрика. Сила сцепления двух поверхностей определяется значением V_{cm} и, как показали экспериментальные исследования, зависит от накачиваемой в структуру энергии $C_{общ}(V_{cm})^2/2$ и равна $5 \cdot 10^5$ Н/Дж. В частности, для величины первоначального зазора 1 мкм и площади подвижного электрода 1 мм² сила сцепления при приложении напряжения 10 В равна $2 \cdot 10^{-2}$ Н. Этой силы при указанной массе подвижного электрода достаточно для жёсткого фиксирования местоположения электрода и удерживания в заданном положении неограниченно долгое время при любых внешних факторах: наличии микровибраций, линейном движении, воздействии воздушных потоков и т. п.

Таким образом, электрическое поле выполняет технологические функции, определяя исходную величину воздушного зазора при исключении необходимости использования буферного слоя.

Методика исследования оптических динамических характеристик элемента. Для исследования оптических динамических характеристик рассматриваемого элемента и особенностей его функционирования использовалась методика [20], основной характеристикой которой является способность регистрации с высокой точностью перемещений поверхности подвижного электрода в диапазоне $1/4$ – $1/2$ длины световой волны. Эта методика основана на явлениях оптической обратной связи и частотной модуляции в по-

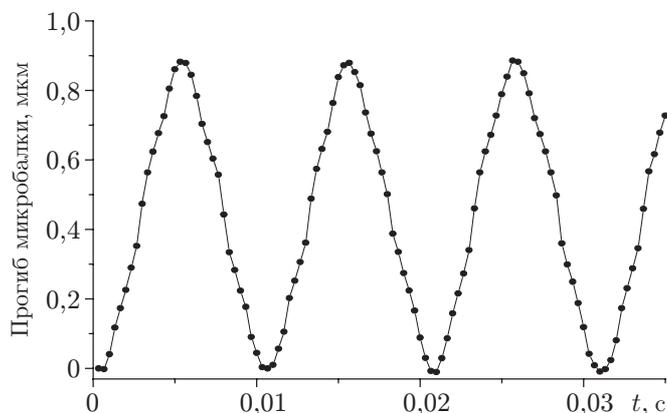


Рис. 5. Изменение во времени амплитуды колебаний поверхности подвижного электрода элемента

лупроводниковых лазерах и позволяет получать информацию о перемещениях диффузно рассеивающих микрообъектов.

Частота интерференционного сигнала пропорциональна расстоянию до микрообъекта, а если он совершает микроперемещения, то фаза сигнала пропорциональна величине этого перемещения. При этом прибор не требует юстировки, лазерный пучок может быть сфокусирован в пятно размером, равным длине волны, а среднее квадратичное значение погрешности измерения составляет 5 нм.

Исследование особенностей перемещения поверхности подвижного электрода элемента. При определении чувствительности смещения поверхности подвижного электрода указанного элемента к амплитуде V_p исследуемый образец закреплялся на плите интерферометра, а лазерный луч фокусировался на поверхность электрода. Интерференционный сигнал с выхода интерферометра подавался на специально разработанный для этих исследований фазометр, включающий в себя электронный блок и компьютер, который вычислял величину перемещения как функцию времени. Характеристики смещения поверхности задавались в динамическом режиме: на образец подавалось напряжение постоянного смещения $V_{см}$ с амплитудой от 2 до 40 В и одновременно переменное напряжение V_p с частотой 50–500 Гц с амплитудами 1, 2, 3, 4 В. На рис. 5 представлен выходной сигнал интерферометра (вибросмещение как функция времени) при возбуждении колебаний

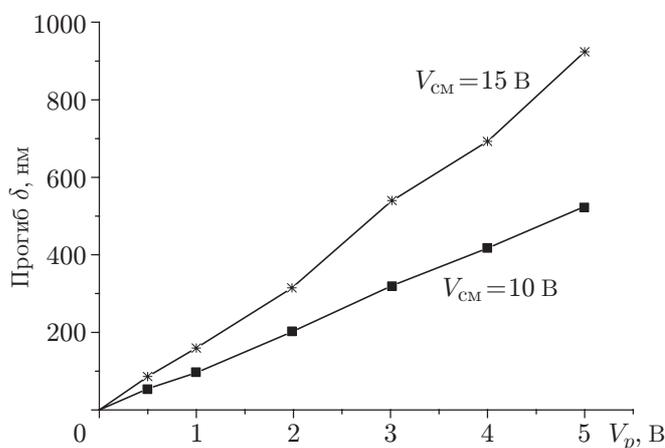


Рис. 6. Зависимость прогиба поверхности элемента от V_p (частота 500 Гц) для разных $V_{см}$, $d = 0,6$ мк

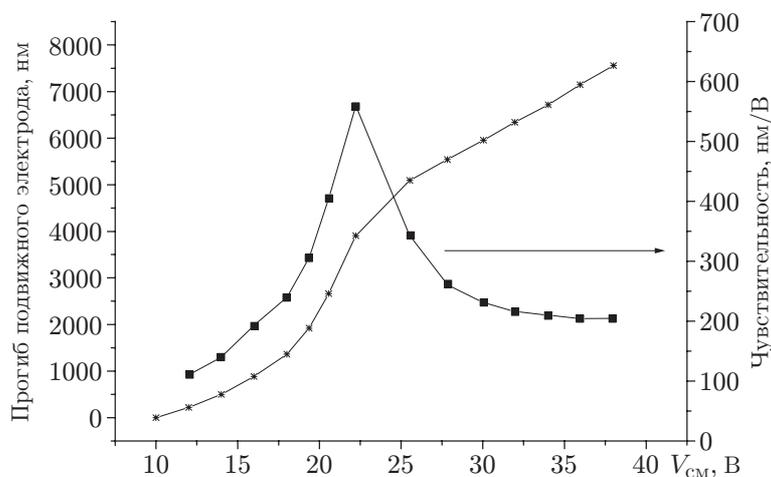


Рис. 7. Изменение δ и $d\delta/dV_p$ в зависимости от V_{cm}

микробалки напряжением $V_p = 2$ В на частоте 300 Гц и $V_{cm} = 15$ В. Размер отражающего элемента (диаметра лазерного луча) составлял 100×100 мкм. Из этих кривых также следует отсутствие гистерезиса на зависимости $\delta(V_p)$ при амплитуде колебаний 400 нм.

На рис. 6 показаны кривые зависимости смещения поверхности отражающего элемента GLV от V_p для различных значений V_{cm} . Как видно, имеет место разная чувствительность величины δ при фиксированной амплитуде V_p к значению V_{cm} . При исследовании влияния величины V_{cm} на чувствительность δ к амплитуде управляющего импульса V_p установлено, что имеет место оптимум $d\delta/dV_p$ относительно V_{cm} (рис. 7). Установлено также, что величины общего прогиба подвижного электрода, вычисляемые из прямых оптических измерений и измерения величины ёмкости структуры $C_{общ}$, практически совпадают.

Наличие оптимума $d\delta/dV_p$ относительно V_{cm} определяется тем, что, с одной стороны, с ростом V_{cm} имеет место нелинейный рост напряжённости поля $E(d_3)$ в зазоре и соответственно электростатических сил, действующих на подвижный электрод, а с другой — по мере уменьшения зазора увеличиваются противоположно направленные механические силы, которые всё более ограничивают величину δ .

Проведённые исследования показывают, что при оптимально выбранном напряжении постоянного смещения чувствительность элемента $d\delta/dV_p$ очень высока и может превышать 640 нм/В. Следовательно, описанная структура как элемент GLV может функционировать при напряжениях менее 1 В.

Заключение. Технология изготовления рассматриваемого элемента по сравнению с известными аналогами значительно более простая и, кроме того, имеется возможность её коррекции за счёт вариации исходных зазоров силами электростатики и амплитуды изменений зазоров в реальном времени под разные длины световых волн. В этом плане устройство GLV на базе описанного элемента может обладать достаточно высокой функциональной гибкостью.

Отметим возможные области применения описанных элементов в GLV-системах:

- при построении высококачественных цифровых дисплеев (как лазерных дисплеев большого формата, так и дисплеев мобильных телефонов), превосходящих по совокупности параметров жидкокристаллические и плазменные;

- в сфере телекоммуникации (они обладают полосой пропускания большой ширины и высокой пропускной способностью, свыше 100 Гбит/с) с переадресацией каналов в оптоволоконных сетях;

- при создании 2D- и 3D-оптических конструкций с использованием оптики свободного пространства;
- в задачах оптической прецизионной метрологии для контроля асферических и конформных поверхностей;
- для формирования диаграммы направленности лидаров (аналог фазированной решётки);
- в устройствах адаптивной оптики, например для создания новых адаптивных систем лазерной локации с высоким быстродействием сканирования и для подавления влияния турбулентной атмосферы на качество изображений.

Авторы благодарят А. М. Щербаченко и А. М. Харина за помощь в проведении экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Castracane J., Yang D., Madison S. et al.** Low power MOEMS components for active optical system // Journ. Microlit., Microfab., Microsyst. 2005. **4**, N 4. 041702.
2. **Norton A., Evans J. W., Gavel D. et al.** Preliminary characterization of Boston micro-machines' 4096-actuator deformable mirror // Proc. SPIE. 2009. **7209**. 72090I-1.
3. **Wu M. C., Solgaard O., Ford J. E.** Optical MEMS for lightwave communication // Journ. Lightwave Technol. 2006. **24**, Is. 12. P. 4433–4454.
4. **Wallace B. P., Hampton P. J., Bradley C. H., Conan R.** Evaluation of a MEMS deformable mirror for an adaptive optics test bench // Opt. Express. 2006. **14**, N 22. P. 10132–10138.
5. **De Dobbelaere P., Falta K., Fan L. et al.** Digital MEMS for optical switching // IEEE Commun. Mag. 2002. **40**, N 3. P. 88–95.
6. **Chu P. B., Lee S.-S., Park S.** MEMS: The path to large optical crossconnects // Ibid. P. 80–87.
7. **Syms R. R. A., Moore D. F.** Optical MEMS for telecommunications // Mater. Today. 2002. July/August Is. P. 26–35.
8. **Yano M., Yamagishi F., Tsuda T.** Optical MEMS for photonic switching — compact and stable optical cross connect switches for simple, fast and flexible wavelength application in recent photonic networks // IEEE Journ. Sel. Top. Quant. Electron. 2005. **11**, Is. 2. P. 383–394.
9. **Luo C., Goossen K. W.** Optical microelectromechanical system array for free-space retro-communication // IEEE Photon. Technol. Lett. 2004. **16**, Is. 9. P. 2045–2047.
10. **Verheggen J. P., Khan-Raja W., Castracane J.** Optimization of diffractive MEMS for optical switching // Journ. Experimental Nanosci. 2007. **2**, N 1–2. P. 87–100.
11. **Amm D. T., Corrigan R. W.** Optical performance of the Grating Light Valve technology // Proc. SPIE. 1999. **3634**. P. 71–77.
12. **Kubota S. R.** The Grating Light Valve projector // Opt. & Photon. News. 2002. **13**, N 9. P. 50–53.
13. **Trisnadi J., Carlisle C., Monteverde R.** Overview and applications of Grating Light Valve based optical write engines for high-speed digital imaging // Proc. SPIE. 2004. **5348**. P. 52–64.
14. **Tamaki E., Hashimoto Y., Leung O.** Computer-to-plate printing using the Grating Light ValveTM device // Proc. SPIE. 2004. **5348**. P. 89–97.
15. **Verheggen J., Panaman G., Castracane J.** Characterization and fabrication of MOEMS-based diffractive optical switching elements // Proc. SPIE. 2006. **6114**. P. 139–147.
16. **Payne A., DeGroot W., Monteverde R., Amm D.** Enabling high data-rate imaging applications with Grating Light ValveTM technology // Proc. SPIE. 2004. **5348**. P. 76–88.
17. **Kostsov E. G.** Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures // Ferroelectrics. 2005. **314**. P. 169–187.

-
18. **Kostsov E. G.** Electromechanical energy conversion in the nanometer gaps // Proc. SPIE. 2008. **7025**. 70251G-1.
 19. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
 20. **Соболев В. С., Кащеева Г. А.** Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. **44**, № 6. С. 49–65.

Поступила в редакцию 21 декабря 2009 г.
