

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЁТКИ: ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Э. Г. Косцов, И. В. Князев

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

Рассматриваются конструкции и особенности функционирования микрооптоэлектромеханических систем, микрозеркальных устройств и дифракционных решёток, управляемых электрическим полем. Описываются элементы микроэлектромеханических дифракционных решёток, а также ряд прикладных задач, которые решаются с их помощью. Предлагается новый элемент микроэлектромеханической дифракционной решётки, основанный на использовании в межэлектродном зазоре диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости. Такой элемент по сравнению с известными аналогами обладает более низким управляющим напряжением, более высокой тактовой частотой и технологичностью. Проводится сравнение характеристик нового элемента и известных аналогов.

Ключевые слова: МЭМС, дифракционные решётки, электростатика, сегнетоэлектрик.

Введение. Микро- и нанозлектромеханические системы (МЭМС, НЭМС) в современной микроэлектронике — наиболее интенсивно развивающийся сектор, масштабы изготовления и применения изделий МЭМС превосходят миллиарды штук [1, 2].

Основной областью применения МЭМС являются микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС), четвертые по объёму коммерческой реализации после МЭМС стабилизаторов частоты, датчиков давления и акселерометров. Их функционирование базируется на комбинации двух микротехнологий: МЭМС и микрооптики.

Можно выделить два направления МОЭМС. Первое из них, развивающееся последние 10–12 лет [3–21], обосновывается использованием матриц микрозеркал с высоким оптическим качеством поверхности, большим диапазоном длин волн отражённого света, превосходящих по этим параметрам другие пространственные модуляторы света, такие как жидкокристаллические, акустооптические и т. д. Второе направление основывается на создании и использовании управляемых электрическим полем перестраиваемых дифракционных решёток (ДР).

В данной работе рассматриваются особенности создания и применения дифракционных решёток и предлагается новый элемент ДР.

Микрозеркальные устройства. Один из примеров матрицы микрозеркал представлен на рис. 1, *a*. Размеры элементов матрицы составляют 15–25 мкм и имеют массу 10^{-10} – 10^{-11} кг [5]. Управление их местоположением (наклоном) осуществляется в большинстве случаев с помощью электростатических микроактюаторов на основе воздушных зазоров, как наиболее технологичных, воспроизводимых и практически безгистерезисных (рис. 1, *b*), и микропроцессора [6].

Микрозеркала выполняют функции параллельных коммутаторов входных оптических каналов по плоскости, соединяя в любую комбинацию определённые пары элементов (входные и выходные) в аналоговом или цифровом режиме (DMD — Digital Micromirror Device).

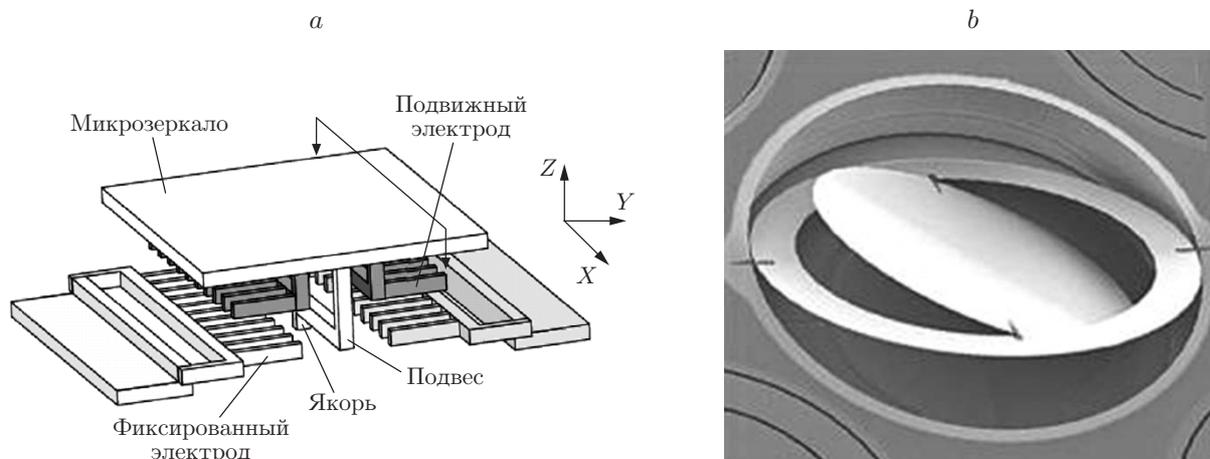


Рис. 1. Примеры конструкций элементов микрозеркальных матриц: *a* — двухосный электростатический привод микрозеркала [22], *b* — SEM-изображение МЭМС 3D-микрозеркала [23]

Такая конструкция требует исключительно высокой точности поддержания позиции каждого микрозеркала и возможности сохранения этой позиции в течение длительного времени. Подобные МОЭМС позволяют построить полностью оптические телекоммуникационные сети в системах передачи информации без преобразования оптический сигнал — электрический сигнал — оптический сигнал, но с возможностью перестройки в режиме реального времени параметров оптических элементов в зависимости от результатов решаемой задачи.

Преимущества данных устройств: устойчивость к воздействию электромагнитных помех, широкий спектральный диапазон, малые потери, небольшой размер, надёжность, низкая стоимость, многоканальность (до 1500×1500 каналов и более), возможность создания 2D- или 3D-конструкций за счёт использования оптики свободного пространства при минимальной чувствительности к вибрации и влажности, применение простых схем управления на основе микропроцессоров.

В настоящее время современные электронные средства передачи информации обеспечивают скорость до 2,5 Гбит/с на порт [4]. Развитие указанной оптической технологии позволяет значительно повысить скорость передачи информации до 150 Гбит/с и более. Препятствием этому пока является их относительно невысокое быстродействие: время переключения коммутатора МЭМС несколько миллисекунд при угле поворота микрозеркала $5\text{--}10^\circ$.

Микрозеркальные оптические устройства нашли применение в следующих областях:

1. Системы многоканальной связи, в том числе межспутниковой [3–11].
2. Скоростные устройства сканирования, в том числе двухкоординатные.
3. Оптические коммутаторы, оптические линейки на чипе.
4. Оптоволоконные оптические компоненты и выключатели, переключатели оптических сигналов, спрос на которые в волоконно-оптических телекоммуникациях по прогнозам будет расти высокими темпами.

5. Адаптивная оптика, поверхностная адаптивная оптика, деформируемые микрозеркала [12–18]. Принцип работы таких систем состоит в измерении формы фронта волны и компенсации искажений, модифицировании фронта волны в режиме реального времени. Адаптивное зеркало МОЭМС является идеальным для адаптивной оптики. Используется матрица микрозеркал (до 4096 шт.) с высокой степенью заполнения ими фокальной плоскости (до 90 %), индивидуально управляемых электростатическими микроактюаторами.

Частота их работы до 3–5 кГц, диапазон смещения конструкции микрзеркал от 1 до 6 мкм при апертуре устройства до 25 мм.

6. Проекционные дисплеи, цифровые видеоустройства и микрзеркальные устройства, DLP-проекторы (Digital Light Processing). В основе оптического чипа лежит технология цифровой обработки света, когда в корпусе DLP-кристалла размещена и микросхема оперативной памяти, каждая ячейка которой определяет положение одного из множества (до 10^6) микрзеркал.

Основное преимущество технологии DLP по сравнению с формирователями других типов — высокая световая эффективность, высокий контраст (до 800 : 1), точность цветопередачи. Данная технология позволяет создавать как мощные проекционные аппараты с большим световым потоком (до 16000 лм), так и пикопроекторы для мобильных пользователей с возможностью введения изображения непосредственно на сетчатку глаза.

Разработка и изготовление микрзеркальных устройств интенсивно ведутся в США, Южной Корее, Японии и других странах.

Дифракционные решётки, управляемые полем. В последние годы разрабатываются принципиально новые оптические МЭМС, в которых используются управляемые полем дифракционные решётки (GLV — Grating Light Valve) [24–41], выполненные в виде последовательности тонких отражающих элементов — микробалок (полосок), меняющих своё пространственное положение (расстояние от базовой плоскости) в зависимости от амплитуды приложенного напряжения V .

Такие системы имеют уникальные параметры, значительно превосходящие МОЭМС, основанные на движении микрзеркал. Их преимущества по сравнению с микрзеркальными устройствами характеризуются как исключительно малой массой 10^{-12} – 10^{-13} кг, так и малой амплитудой перемещения в межэлектродном зазоре под действием сигнала на 0,1–0,3 мкм.

Число микробалок в устройстве 10^3 – 10^4 , расстояние между ними d , минимальное из технологически достижимого, например 0,3–1 мкм, поскольку коэффициент заполнения поверхности микробалками задаёт яркость изображения, дифракционную эффективность (ДЭ). Величина воздушного зазора определяет спектральную область работоспособности прибора, для видимой части спектра она составляет 300–600 нм. Тонкая микробалка с высокой отражательной способностью изгибается под действием сил электростатики, при этом прогиб в зазоре между микробалкой и электродом не превышает четверти длины волны модулируемого света.

Технология изготовления микробалок состоит в их нанесении (напылении Al, Ag) на поверхность жертвенного слоя, который затем удаляется, например, изотропным травлением в атмосфере сухого дифторида ксенона, образуя воздушный зазор. Толщина жертвенного слоя, осаждаемого на стоп-слой для остановки травления, должна быть оптимизирована для работы в заданной области спектра. Один из примеров практической реализации линейки микробалок представлен на рис. 2 [29]. В этом устройстве управляемые элементы объединяются в группы по 4–6 микробалок (условно называемые пикселями), которые при подаче на них рабочего напряжения соответствующим образом прогибаются, создавая условия для дифракции поступающего на поверхность микробалок света. В таких структурах входной лазерный луч с высокой скоростью преобразуется на выходе в пространственно-временной образ, переводя падающее излучение в 0-й или ± 1 -е порядки дифракции под заданным углом. Этот угол определяется классической теорией дифракции на отражательных решётках (см., например, [42]) в зависимости от размерности пикселя, длины волны света λ и угла его падения на решётку (рис. 3).

Для разделения в пространстве отражённого и дифрагированного световых потоков применяется оптическая система, которая блокирует отражённый свет и собирает дифрагированный, что даёт возможность получить контраст до 3000 : 1 (рис. 4) и высокую

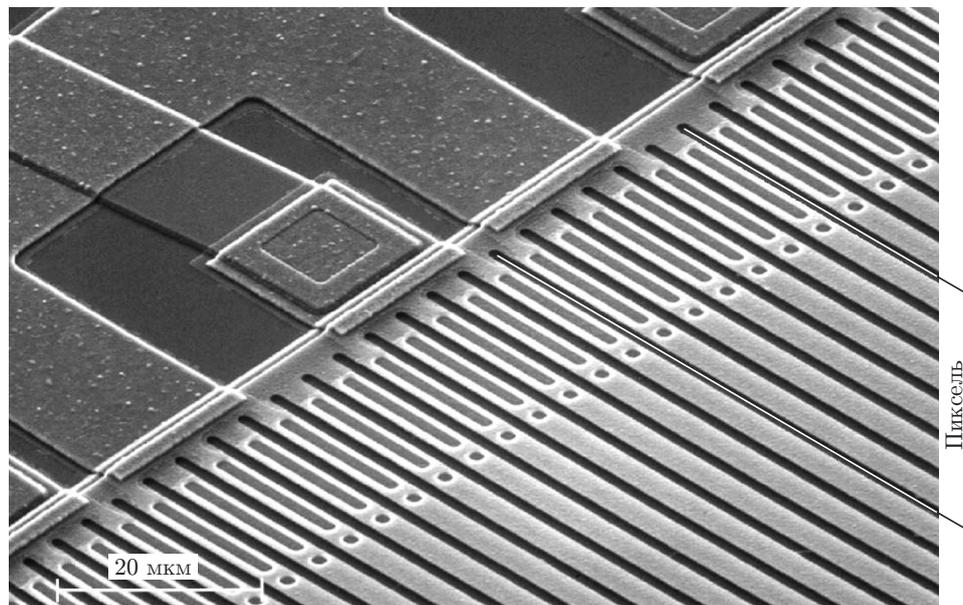


Рис. 2. SEM-фотография полосок GLV: ширина микробалки $b = 2$ мкм, длина $L = 200$ мкм, расстояние между микробалками $d = 0,5$ мкм

ДЭ — отношение интенсивности излучения в заданном порядке дифракции к общей интенсивности падающего на решётку излучения [26, 32]. Можно отметить, что в идеальной дифракционной решётке, выполненной в виде ступенек, 81 % дифрагированной энергии поступает в ± 1 -е порядки дифракции, а с помощью оптических устройств можно собрать в полезном сигнале энергию от трёх порядков дифракции и получить дифракционную эффективность более 90 %.

Зазор между микробалками d определяется технологическими возможностями, его увеличение ухудшает оптическую эффективность прибора (рис. 5 [32]).

Есть два режима работы устройства: цифровой и аналоговый. В первом случае используются только два положения микробалки и свет поступает или не поступает в канал дифракции в направлении, соответствующем заданному углу дифракции. Максимальная интенсивность дифрагированного света достигается, когда микробалка имеет прогиб δ равный $\lambda/4$, при этом должно иметь место плоскопараллельное смещение поверхностей микробалок относительно базового электрода.

В аналоговом режиме возможно любое положение микробалки в зазоре от 0 до $\lambda/4$, таким образом создаётся градация оттенков серого цвета с 8- или 10-битовой разрядно-

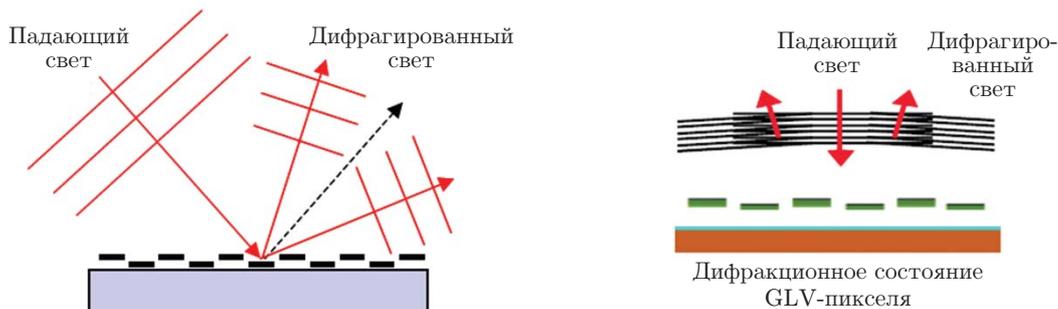


Рис. 3. Возможные схемы формирования потоков дифрагированного света

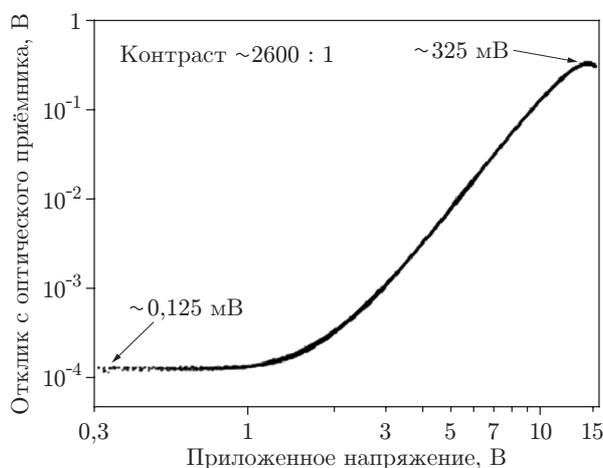


Рис. 4. Электрооптический отклик устройства GLV в ± 1 -х порядках дифракции

стью, с намного более широкой гаммой серого (цветностью), чем в ЖК-мониторах (см. рис. 4), и изменением уровня интенсивности.

Можно отметить, что не видно физических ограничений и для построения 12- или 14-битовых пикселей в отличие от 8-битовых в современных ЖК-мониторах, разрядность которых ограничена размерами светоизлучающих элементов.

В общем виде устройство GLV (рис. 6) состоит из следующих блоков: 1 — источник светового потока; 2 — оптическая система, например цилиндрические асферические линзы, преобразующие световой пучок с гауссовым распределением интенсивности по площади пучка в линию, длина которой соответствует длине линейки элементов GLV, а ширина — длине плоскопараллельной части микробалок; 3 — линейка микробалок GLV — основной блок устройства; 4 — коммутатор дифрагированного светового потока. Электронный блок системы управления устройством на рисунке не обозначен.

Источником света в конструкциях GLV обычно служит линейка твердотельных лазеров для формирования достаточно мощного светового потока. Лазеры в линейке не должны иметь ни очень высокого качества, ни однородности параметров, поскольку эффективность модулируемого линейкой GLV света определяется усреднёнными параметрами источника. Такая схема облучения даёт хорошую однородность и обеспечивает защиту от потенци-

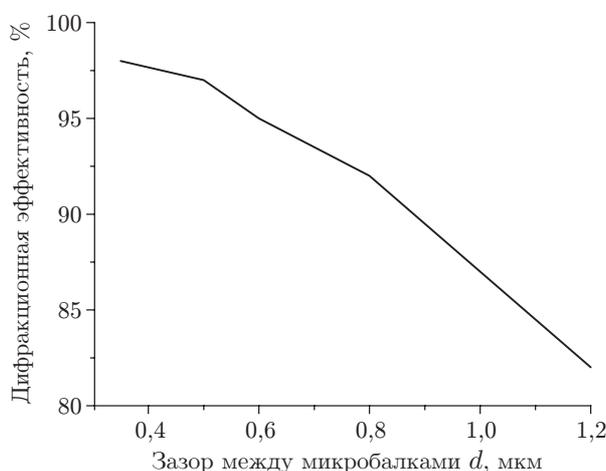


Рис. 5. Уменьшение дифракционной эффективности при увеличении зазора

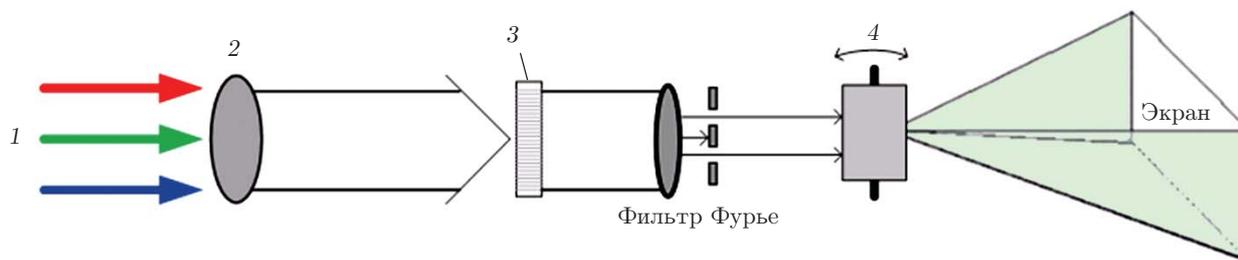


Рис. 6. Схема HDTV-проектора на основе GLV (до $2 \cdot 10^6$ пиксель/кадр, скорость считывания до 10^9 пиксель/с)

альной неисправности любого лазера. Одна неисправность приводит только к 4 % потери мощности, распределённой равномерно по всем элементам линейки GLV.

Поскольку интенсивность излучения дифракционного луча симметрична относительно углов падения и отражения, в реальном устройстве можно подавать на решётку сфокусированный конус лучей, что важно на практике. Падающий и отражённый лучи легко разделяются путём введения небольшого угла падения светового потока, обычно $5\text{--}15^\circ$.

При сравнении с другими оптическими технологиями МЭМС, например микрозеркальными, GLV имеют следующие преимущества:

1. Они более высокотехнологичны, при этом линейка GLV и электронный блок управления могут размещаться на одном кристалле. Совместимость технологии GLV и производства МОП-структур даёт возможность использовать уже отработанные технологии с заданными допусками, обеспечивающие короткий цикл разработки новых устройств, высокий выход годных изделий. GLV отличаются низкой стоимостью из-за большого количества оптических микрочипов, которые могут быть изготовлены на одной пластине (например, на 8-дюймовой подложке до 100 чипов).

2. Значительно более высокое быстродействие, определяемое малой массой подвижного электрода: возможны частоты модуляции света до 10 МГц и выше. Переключение элементов (микробалок) происходит очень быстро — со скоростью до 20 нс и менее. Это в 10^6 раз быстрее, чем в жидкокристаллических индикаторных устройствах.

3. Низкие потери света при высокой отражательной способности поверхности микробалки, например плёнки серебра, и соответственно возможность использования высокой плотности энергии модулированного светового потока (до $(10\text{--}60) \cdot 10^7$ Вт/м²) при меньшем количестве оптических элементов.

4. Варьирование в широком диапазоне интенсивности света (до трёх порядков), которое является очень точным и воспроизводимым, способность подстраивать однородность элементов матрицы уже после её изготовления.

5. Высокая воспроизводимость углового распределения светового потока, устанавливаемая точностью проведения литографии при производстве линейки микробалок.

6. Высокая надёжность и устойчивость, определяемые небольшим отклонением поверхности микробалки от исходного положения (сотни нанометров) без физического контакта между движущимися элементами, что позволяет избежать механической усталости, износа и отказа из-за залипания поверхностей, распространённых в других устройствах МОЭМС.

7. Возможность создания очень большого числа оптических каналов, к каждому из которых поступает свой управляющий сигнал, при способности одной линейки обеспечивать различные форматы изображения.

8. Совместимость устройства на основе GLV с известными оптическими системами записи при создании полностью цифровой системы визуализации изображений.

9. Простое осуществление перехода к управлению потоками излучения в широком диапазоне длин волн (от ультрафиолетового до дальнего ИК-излучения) только за счёт изменения амплитуды колебаний поверхности микробалок при соответствующем изменении величины воздушного зазора d_z .

10. Длительное сохранение неизменными параметров GLV. В частности, при измерении уровня выходного света в течение 11200 ч установлено незначительное отклонение от исходных значений параметров каждой из множества микробалок при импульсах напряжения 20,2 В. Дрейф составляет не более $3,7 \cdot 10^{-5}$ дБ/ч, что соответствует уходу амплитуды колебаний поверхности микробалки менее чем на 0,5 нм [29].

В настоящее время технология GLV успешно используется в различных областях информационной техники, например: при построении высококачественных цифровых дисплеев, цифровых систем формирования изображений при WDM-телекоммуникации, устройств «тепловой» печати, систем ультрафиолетовой литографии, однокристалльных спектрометров, включая ИК-спектрометры Фурье — других применениях, которые не были ранее достижимы с помощью больших дискретных оптических систем. Основные преимущества указанных устройств по сравнению с аналогами определяются высокой эффективностью преобразования сигналов, широким динамическим диапазоном, высоким контрастом и скоростью передачи данных, высокой надёжностью, технологичностью и возможностью интеграции множества каналов в одном устройстве.

Несмотря на то что технология GLV ещё находится в стадии развития, она может широко применяться и при решении следующих задач:

- построении высококачественных цифровых дисплеев: лазерных проекторов большого формата (до 3–5 м и более) и дисплеев мобильных телефонов, превосходящих по совокупности параметров ЖК- и плазменные дисплеи;

- в сфере телекоммуникаций с переадресацией каналов благодаря наличию широкой полосы пропускания и высокой пропускной способности (свыше 150 Гбит/с и более), в том числе в оптоволоконных сетях;

- создании различных оптических 2D- и 3D-конструкций с использованием оптики свободного пространства;

- построении программируемых высококачественных спектрометров;

- формировании диаграммы направленности оптических лидаров, аналогов фазированной решётки;

- в технологических мощных лазерных установках для динамического преобразования формы и размеров режущего пучка;

- в устройствах адаптивной оптики, в частности, для создания новых адаптивных систем лазерной локации с высоким быстродействием сканирования и подавления влияния турбулентной атмосферы на качество изображений;

- в задачах оптической прецизионной метрологии для контроля асферических и конформных поверхностей.

Для описания особенностей функционирования устройств GLV рассмотрим примеры практического использования указанной оптической технологии.

Высококачественное цифровое ТВ на основе GLV. Технология GLV даёт возможность создавать полноцветные изображения на основе только одной линейки GLV, когда излучение от источников красного, зелёного и синего цвета последовательно коммутируется с высокой скоростью (сотни килогерц и более) и для HDTV восстанавливается в одно цветное изображение непосредственно на экране.

Малое время переключения пикселей позволяет использовать только одну линейку микробалок, одну строку с последующим построчным сканированием светового луча. Формирование строки осуществляется с высокой скоростью. Одновременное переключение элементов пикселя в соответствии с поступающей на строку информацией происходит

за время порядка 4 мкс, «обратный ход» — подготовка к приёму новой информации на следующей строке — занимает порядка 1 мкс. Световой поток от строки проецируется на экран, далее с помощью этой же линейки формируется следующая строка изображения. Формирование изображения непосредственно на экране строка за строкой производится простой сканирующей системой. В частности, в качестве сканирующего устройства может быть использовано и гальваническое.

Излучение от источников красного, зелёного и синего цветов (твердотельных лазеров с длинами волн 642, 532 и 457 нм) последовательно направляется (высокоскоростная коммутация до $(1-5) \cdot 10^5$ Гц) на линейку GLV, и цветное изображение формируется непосредственно на экране. Специфика глаза человека объединяет каждую из цветных компонент изображения в единый образ, и для каждой из линий разрыв образа для глаза не наблюдается из-за быстрого сканирования строк поперёк экрана.

Компания "Sony Corporation" (Япония), базируясь на разработках корпорации "Silicon Light MachinesTM" (США), получила ряд коммерческих лицензий на использование микросхем GLV для систем формирования изображения в больших проекционных установках для цифрового кино. Все они обладают высоким уровнем контраста в видимом диапазоне длин волн (3000 : 1), скоростью модуляции светового потока 0,3–1 МГц, при этом размер подвижного элемента пикселя составляет $5,3 \cdot 10^{-12}$ м², что в несколько раз меньше, чем в микрзеркальных аналогичных устройствах МОЭМС типа DMD фирмы "Texas Instruments" (США).

Известно несколько конструктивных решений построения полноцветных изображений в ТВ-стандарте на базе технологии GLV размерностью 1920×1080 элементов и частоте кадров 100–120 Гц. При 6-элементном пикселе число микробалок в строке $6 \cdot 1080 = 6480$ и общая длина строки при ширине микробалки 3 мкм и зазоре между ними 0,35 мкм равна $2,17 \cdot 10^{-2}$ м. Эта величина определяет длину полосы светового потока, поступающего на линейку. Другой параметр — ширина луча L_r — задаётся длиной микробалок L . Однако отметим, что реально эта ширина может быть значительно меньше L : активная, подвергаемая воздействию света поверхность микробалки может быть в 2–3 раза меньше длины микробалки и иметь значения от 100 до 25 мкм.

В частности, проведённое в [37] моделирование поведения поверхности микробалки при общей длине $L = 100$ мкм и напряжении 25 В показало, что длина её поверхности, обеспечивающей высокий уровень контраста, составляет 24 мкм, а при $L = 300$ мкм и напряжении 6 В — 100 мкм. Таким образом, при реальном использовании устройства необходима его предварительная градуировка, определение оптимальных режимов относительно совокупности ранее указанных параметров. Важным фактором здесь является высокая воспроизводимость характеристик прибора.

Устройства на основе технологии GLV достаточно легко перестраиваемы. Так, в [43] при фотометрии параметров раствора глюкозы с помощью КМОП МЭМС дифракционной решётки в микроспектрофотометре ближней ИК-области решалась задача оптимизации протяжённости спектрального диапазона и оптического разрешения. Необходимость нахождения компромисса между указанными параметрами связана с ограниченными возможностями КМОП-технологии.

Формирование цифрового изображения с высокой интенсивностью светового потока. Ещё одна практически важная особенность GLV — возможность использования высоких интенсивностей светового потока, поскольку GLV содержит устойчивые к мощному потоку материалы, в частности нитрид кремния, покрытый тонкой плёнкой металла с высокой отражающей способностью (до 96–98 %). Другие компоненты структуры: кремний, поликристаллический кремний и диоксид кремния — также устойчивы к мощному излучению. Устройства уже опробованы на воздействие светового потока мощностью $(5-10) \cdot 10^6$ Вт/м² без деградации параметров, что значительно превосходит пороговые

параметры других известных пространственных модуляторов света мощностью не более 10^4 Вт/м².

Высокая плотность энергии излучения и её мощность, допустимая при функционировании GLV, позволяют разработать несколько не имеющих аналогов технологий формирования высокоинтенсивных световых потоков для создания высококачественного цифрового изображения как на большом экране, так и непосредственно на поверхности пластины при скорости формирования строк с частотой до 300–500 кГц, высоким контрастом и плотностью записи до 10^{10} точек/м². При высокой мощности источника излучения могут осуществляться режим лазерной абляции (удаление вещества пластины световым импульсом), прецизионная гравировка поверхности, включая поверхность металла, в частности мелкозернистую поверхность анодированного алюминия, при этом предусматривается удаление всех микрочастиц, образующихся в процессе обработки.

Такое применение технологии GLV впервые продемонстрировали корпорации "Silicon Light MachinesTM" и "Agfa Corporation" (США) [32]. Использовались источники лазерного излучения с длиной волны 0,83 мкм и мощностью до 60 Вт. Устройство "Xcalibur VLF" позволяет получать высококачественные покадровые изображения в виде отдельных пятен размером 10 мкм на поверхности пластин площадью от 565×450 до 2030×1475 мм с разрешением 500 и 1000 лин./см при скорости записи 10^8 пиксель/с. В устройстве применялись системы автоматической фокусировки, лазерные системы измерения расстояния до поверхности пластин, контроль температуры в каждой точке с обратной связью, позволяющие в режиме реального времени компенсировать отклонения температуры и механических напряжений от оптимальных значений.

Технология GLV широко используется при осуществлении безмасочной ультрафиолетовой литографии в диапазоне длин волн 190–400 нм с помощью Nd:YVO₄-лазера с длиной волны 355 нм [29]. Переход указанной технологии в коротковолновой диапазон длин волн достаточно простой — необходимо выбрать амплитуду колебаний микробалок в заданном воздушном зазоре порядка 0,2–0,4 мкм, что технологически не представляет затруднений.

Элементы технологии GLV. Рассмотрим особенности конструкции и функционирования элементов технологии GLV. Типичная структура и параметры базового элемента GLV [29, 30] следующие: Si—нижний электрод W (вольфрам)—SiO₂—воздушный зазор d_z —подвижный элемент (Si₃N₄ + Al), представляющий собой микробалку длиной 50–500 мкм, шириной 2–10 мкм и толщиной 0,3–1 мкм (рис. 7). Толщины других указанных плёнок: нижнего электрода — 100 нм, SiO₂ — 500 нм, воздушного зазора — 130–600 нм, Si₃N₄ — 0,1–0,3 мкм, Al — 0,2–0,7 мкм. Плёнка Al выполняет функции как оптического отражателя, так и проводника.

Плёнка Si₃N₄ предотвращает непосредственный электрический контакт подвижного и неподвижного электродов. Одновременно этот диэлектрический слой служит и как упругая балка, определяющая возможность работы ДР в резонансном режиме. Таким образом,



Рис. 7. Пример конструкции элемента GLV

конструкция каждого элемента GLV достаточно простая, как и металлическая разводка проводников к каждому элементу, нет необходимости использовать 3D-технологии.

Описать все стадии движения микробалки можно с помощью дифференциального уравнения [44], в котором учитываются её основные параметры: масса M , жёсткость упругих элементов G , вязкость воздушной среды R . Оно даёт возможность найти точные соотношения между параметрами, характеризующими собственные колебания подвижного элемента с частотой

$$f_R = \sqrt{G/M} \quad \text{при } R = 0. \quad (1)$$

Как известно, резонансная частота колебаний балки, жёстко закреплённой двумя концами, с достаточно высокой точностью описывается следующим выражением (см., например, [36]):

$$f_R = \frac{\pi b \sqrt{E/3\rho}}{4L^2}, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала балки, b — её ширина, E — модуль Юнга.

Из специфики функционирования элементов GLV следует, что это выражение не может быть использовано при анализе перспектив дальнейшего улучшения параметров устройств, в частности увеличения одного из основных параметров GLV — тактовой частоты работы. Действительно, значение b ограничено особенностями дифракции: с увеличением ширины балки резко снижаются углы падения и регистрации светового потока, а с уменьшением L — его интенсивность. Из приведённого выражения с учётом реальных значений b и L и величины E равной $2 \cdot 10^{11}$ Н/м² (для Si₃N₄) следует, что f_R должно находиться в лучшем случае в области киллогерцовых частот, и из этого, в свою очередь, следует, что более высокочастотные колебания микробалок будут определяться дополнительными внешними упругими элементами с объёмной конструкцией (см. рис. 7).

Основными параметрами, характеризующими качество изображения с использованием технологии GLV, являются: амплитуда управляющего импульса V , его длительность t_p , механическая упругость в элементе G , прогиб микробалки δ , размерность решётки N , дифракционный угол, контраст изображения, дифракционная эффективность, а также коэффициент отражения света от поверхности микробалки.

С учётом малости воздушного зазора в сравнении с шириной и длиной поверхностей электродов нетрудно показать, что в каждом положении x подвижного электрода внутри зазора электростатическая сила $F(x)$, действующая на него, имеет вид

$$F(x) = \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2(d_z + h/\varepsilon - x)^2}, \quad (3)$$

где h — толщина слоя диэлектрика; ε — диэлектрическая проницаемость.

Особо отметим, что эта сила зависит от величины ε диэлектрика, размещённого между двумя проводниками.

Как известно [44, 45], решение указанного дифференциального уравнения однозначно описывает колебательный процесс, если выполняется неравенство, ограничивающее разность потенциалов

$$V < \frac{2\pi}{t_p} \sqrt{\frac{8M}{27\varepsilon_0 S} \left(d_z + \frac{h}{\varepsilon}\right)^3}. \quad (4)$$

При невыполнении этого условия поверхность микробалки за конечное время необратимо и самопроизвольно достигнет поверхности диэлектрика, произойдёт явление «схлопывания», залипания двух поверхностей. Это явление типично для электромеханических

систем с подвижным электродом. Напряжение схлопывания $V_{сх}$ определяется конкретными параметрами колебательной системы. Не нарушая общности анализа и оставляя в стороне точные соотношения, связывающие в конкретном случае $V_{сх}$ и δ/d , будем полагать с учётом возможной шероховатости поверхности диэлектрика, что амплитуда колебаний микробалки δ составляет 30 % общей протяжённости зазора.

Из (3), (4) нетрудно найти соотношения, связывающие в любой момент времени периода колебаний положение поверхности микробалки и все основные вышеуказанные параметры структуры, определяющие процесс её движения [44], а также время прогиба t_p микробалки на заданную величину δ при воздействии импульса напряжения V_p :

$$t_p = \frac{2\pi}{V_p} \sqrt{\left(d_z + \frac{h}{\varepsilon} - \frac{\delta}{2}\right) \frac{M\delta}{2\varepsilon_0 S}}. \quad (5)$$

В последнем случае возможны релаксационные колебания поверхности микробалки, определяемые вязкостью воздушной среды. Описание этого процесса можно получить, используя уравнения из [44], с учётом сопротивления внешней среды.

Анализ особенностей функционирования представленных в литературе структур GLV показывает:

1. В известных структурах GLV напряжение используется недостаточно эффективно: значительная его часть прикладывается не к воздушному зазору (подвижному электроду), в котором и происходит электромеханическое преобразование энергии, определяющее параметры процесса прогиба микробалки, а к диэлектрическому слою с низкой диэлектрической проницаемостью. Так, на рис. 8 показано отношение падения напряжения V_z на зазоре протяжённостью до $6 \cdot 10^{-7}$ м к амплитуде импульса напряжения. Как видно, при зазоре $3 \cdot 10^{-7}$ м, наиболее часто применяемом в известных структурах, только 25–30 % энергии необходимо для обеспечения движения микробалки. Этот фактор определяет относительно высокие напряжения, которые требуются для создания заданного прогиба микробалки.

2. Использование Si_3N_4 в качестве материала микробалки с его способностью к накоплению и длительному хранению наведённого при циклировании напряжения заряда на глубоких энергетических центрах с $E_t = 1,6$ эВ приводит к гистерезису на кривой прогиб — напряжение [24], который может быть соизмерим с управляющим напряжением. Влияние этого эффекта увеличивается с ростом тактовой частоты, что требует дополнительной настройки параметров элементов и применения двуполярных импульсов напряжения.

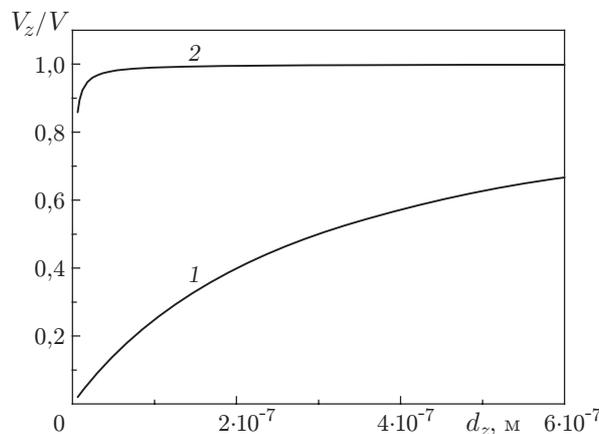


Рис. 8. Отношение падения напряжения на воздушном зазоре V_z к амплитуде импульса напряжения (кривая 1 — плёнка Si_3N_4 толщиной 0,3 мкм, $h/\varepsilon = 3,3 \cdot 10^{-8}$ м; 2 — плёнка NBS толщиной 1 мкм, $h/\varepsilon = 10^{-9}$ м)

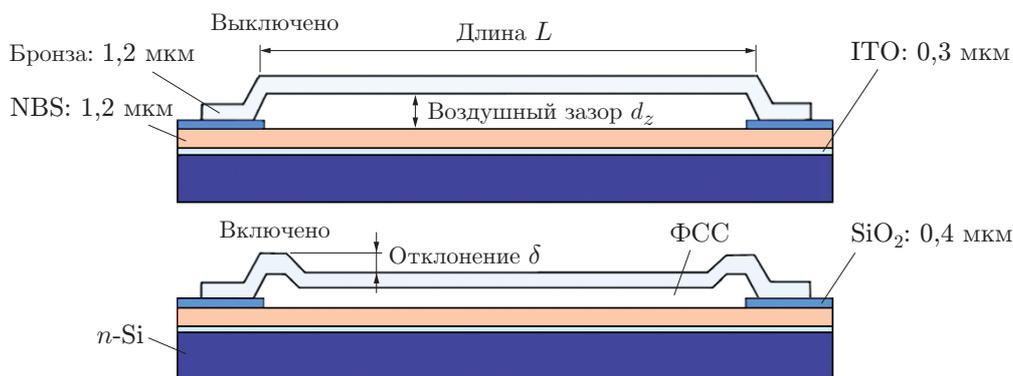


Рис. 9. Конструкция нового элемента GLV: Si—ITO—NBS—SiO₂—воздушный зазор—микробалка (металл) (ФСС — фосфорно-силикатное стекло)

3. Толщина плёнки Si₃N₄ является достаточно критичным параметром, который нужно соблюдать с высокой точностью. С одной стороны, именно его малое значение обеспечивает возможность получения высокой тактовой частоты. С другой стороны, при высоких частотах (более 1 МГц) необходимо значительное увеличение жёсткости в конструкции микробалки и соответственно использование импульсов напряжения с высокой амплитудой, ограниченной электрической прочностью тонкой плёнки нитрида кремния. В то же время рост толщины плёнки Si₃N₄ (её массы) снижает эти частоты, одновременно увеличивая ширину петли гистерезиса, создавая дополнительные потери энергии и усложняя процесс управления устройством.

Кроме того, формирование свободной двухслойной микробалки недостаточно технологично, так как из-за разности коэффициентов термического расширения имеет место изгиб поверхности микробалки, особенно при изменении температуры: уход от плоскопараллельности поверхностей. Необходимо также точно оптимизировать соотношение толщин Al и Si₃N₄, поскольку при небольшой толщине Al отражение света от поверхности микробалки будет недостаточно и, наоборот, при увеличении этой толщины будут нарушаться условия проявления резонанса.

Новые элементы GLV. Новый элемент GLV (рис. 9) отличается от вышерассмотренного более низким управляющим напряжением, более эффективным электромеханическим преобразованием энергии, практическим отсутствием гистерезиса, более высокой технологичностью.

Элемент имеет следующую конструкцию: подложка (кремний или сапфир)—электрод (ITO)—диэлектрическая (сегнетоэлектрическая) плёнка с высоким значением ε (1000–3000 и более)—управляемый полем воздушный зазор—отражающий свет подвижный электрод (металлическая плёнка, например серебро, бронза). Число технологических операций при изготовлении этого элемента меньше, по крайней мере на пять, чем при изготовлении известных элементов GLV.

Рассматриваемая конструкция элемента дифракционной решётки имеет следующие отличия от известных аналогов:

1. Применяется диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости, что даёт возможность снизить управляющее напряжение, которое практически полностью прикладывается только к зазору (см. рис. 8), и соответственно поднять тактовые частоты.

2. Используется кристаллический диэлектрик, что снижает накопление заряда в многослойной структуре и практически устраняет гистерезис.

На рис. 10, 11 приведены графики, характеризующие особенности функционирования новых элементов и ранее описанных элементов на основе Si₃N₄ при фиксированной массе

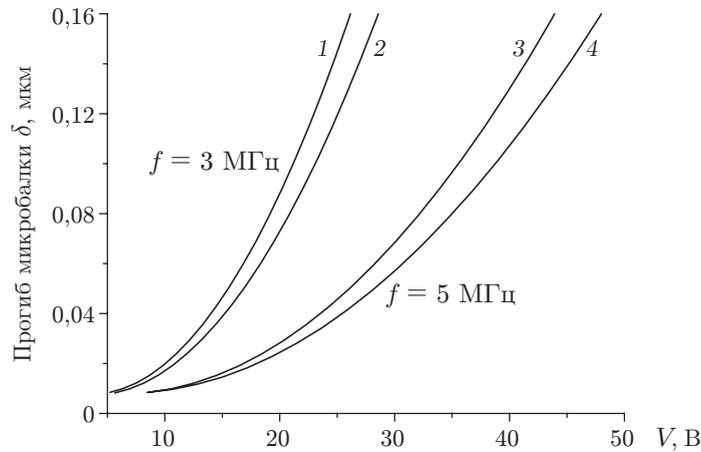


Рис. 10. Зависимость δ от V для двух указанных конструкций элемента GLV: Si—ITO—NBS—SiO₂—воздушный зазор—подвижный элемент (Ag, Al) (кривые 1, 3); Si—нижний электрод (W)—SiO₂—воздушный зазор—подвижный элемент (Si₃N₄ и Al) (кривые 2, 4)

подвижной микробалки 10^{-12} кг и жёсткости $G = 455$ и 1000 Н/м для частот 3 и 5 МГц соответственно и для воздушного зазора $d_z = 0,5$ мкм. Новый элемент имеет следующие отличительные особенности и преимущества:

1. Для обеспечения прогиба микробалки на заданную величину, в том числе на $\lambda/4$ (см. рис. 10), необходима меньшая амплитуда импульсов напряжения.
2. Более высокая частота модуляции достигается при меньших значениях амплитуды импульсов напряжения.
3. Диэлектрик неподвижен, находится на неподвижном электроде, что повышает технологичность и надёжность и упрощает требования учёта ряда механических параметров, например пластичности, прочности на растяжение и т. п.
4. Толщина диэлектрика не столь критична, как в прототипе, она несущественно влияет на частоту через жёсткость микробалки, её можно варьировать в достаточно широком диапазоне. Кроме того, толщина этого диэлектрика может достигать до 3–5 мкм, что позво-

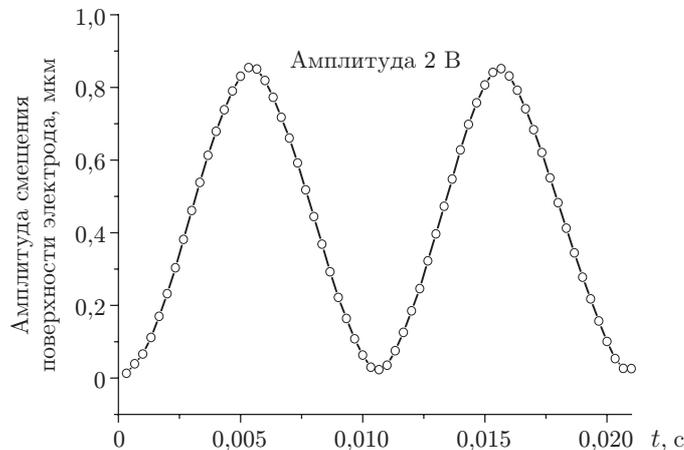


Рис. 11. Изменение во времени амплитуды колебаний подвижного электрода при напряжении 2 В

ляет при увеличении амплитуды импульсов напряжения обеспечить достижение высоких частот работы устройств GLV (до 30–100 МГц и более).

Были проведены экспериментальные исследования элементов GLV новой конструкции. В качестве сегнетоэлектрика использовалась плёнка ниобата бария—стронция (NBS), модифицированного лантаном: $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Nb_2O_6 + 1\% La$. Толщины плёнок ITO и NBS составляли 0,2–0,5 мкм и 0,3–1 мкм соответственно. Подвижный электрод — тонкая плёнка бериллиевой бронзы. Технология получения этих плёнок и их основные электрофизические свойства изложены в [46, 47].

Для исследования оптических динамических характеристик рассматриваемого элемента и особенностей его функционирования применялась описанная в [48] методика, способная регистрировать с высокой точностью перемещения поверхности подвижного электрода в диапазоне $1/4$ – $1/2$ длины световой волны. Диаметр светового луча составлял 100 мкм, среднеквадратичное значение погрешности измерения 5 нм.

Данная методика формировалась на явлениях оптической обратной связи и частотной модуляции в полупроводниковых лазерах. Частота интерференционного сигнала пропорциональна расстоянию до микрообъекта, и если он совершает микро- и наноперемещения, то фаза сигнала пропорциональна величине этого перемещения.

Исследования указанных элементов показали [49], что чувствительность элемента $d\delta/dV$ на базе плёнок NBS толщиной 0,6 мкм и $\varepsilon = 1000$ очень высокая и может превышать 640 нм/В. Наблюдается практически полное отсутствие гистерезиса (см. рис. 11). На рисунке представлена развёртка во времени амплитуды прогиба микробалки (плёнка бронзы толщиной 1 мкм) при воздействии синусоидального напряжения с амплитудой 2 В. Величина воздушного зазора выбрана 1,5 мкм.

Заключение. Технология GLV, основанная на создании совокупности большого числа тонких свободных микробалок, расположенных на равном расстоянии с малым периодом, осуществляющая при наблюдении в отражённом свете пространственную модуляцию падающей световой волны по амплитуде или фазе, уже нашла широкое практическое применение. Этот успех обеспечен тем, что производство новых устройств базируется на технологии современной микроэлектроники с простой интеграцией с логическими МОП-структурами при низкой стоимости процесса их изготовления. Устройства на основе GLV обеспечивают в масштабе реального времени создание высококачественных, информационно ёмких и переконфигурируемых в цифровом или аналоговом виде изображений для широкого спектра практических задач.

Данная технология превосходит другие известные оптические технологии формирования изображений по совокупности параметров: эффективности модуляции света, контрасту, надёжности, скорости переключения интенсивности светового потока, мощности управляемого потока.

Отметим, что не видно принципиальных физических ограничений на создание двумерной матрицы GLV. Она может быть использована при построении 2D-изображений за один такт (или три такта при полноцветном изображении) без необходимости построчного сканирования изображения. Главной проблемой в этом случае будет не технология создания такой матрицы и соединений для ввода информации, а конструкция оптической системы облучения матрицы и приёма сформированного изображения, дающей возможность поддерживать его высокий контраст.

Описанная технология, базирующаяся на управлении положением тонких свободных плёнок с помощью сил электростатики, которые с высокой скоростью перераспределяют световые потоки, может применяться не только в дифракционных устройствах, но и новых приборах интерференционной оптики. Ими могут стать дисплеи МЭМС, основанные на движении под действием электростатического поля тонкой полупрозрачной мембраны,

как компонента перестраиваемого поля интерферометра Фабри — Перо. Мембрана может находиться в одном из двух состояний (как микробалка в GLV) вблизи поверхности проводящей плёнки. Когда плёнка и мембрана разделены воздушным зазором, световые волны, отразившиеся от плёнки, интерферируют с волнами, прошедшими сквозь неё и отразившимися от мембраны, в результате чего выделяется излучение определённого цвета. Если же зазор отсутствует, то интерференция не проявляется. Варьируя величину зазора, можно получить три основных цвета.

Геометрические размеры интерференционного модулятора (IMOD) составляют всего десятки микрон, что значительно меньше размеров пикселей в современных дисплеях. Один пиксель в дисплее состоит из трёх субпикселей (трёх мембран) для красного, зелёного и синего цветов. Такой дисплей будет обладать хорошим качеством изображения: высокой яркостью и цветовой насыщенностью. Кроме того, он будет очень тонким, иметь предельно низкий уровень энергопотребления и не будет нуждаться в лампах подсветки и цветовых фильтрах, как в ЖК-панелях TFT.

Разработки таких устройств проводятся уже в течение восьми лет. Одним из лидеров в этой области является компания "Mirasol Display Technology Qualcomm" (США). Используется конструкция и материалы такие же, как и в GLV, только слой металла (алюминия) полупрозрачный. Предполагается, что дисплей может применяться в 5-, 7-дюймовых устройствах "E-Reader" с разрешением 1024×768 пикселей, возможностью наблюдения под углом до 170° , контрастом до $3000 : 1$ и частотой кадров до 30 Гц. Дисплей не требует подсветки, его можно использовать при солнечном свете, поэтому он потребляет значительно меньше энергии, чем ЖК-дисплей.

Смещение подвижного электрода (мембраны) на величину $1/2\lambda$, в 2 раза большую, чем в GLV, диктует необходимость использования больших значений напряжения с соответствующим влиянием большей петли гистерезиса. Несмотря на то что уже созданы первые образцы дисплеев IMOD, эти факторы пока затрудняют завершение очень перспективного проекта. Описанный в данной работе принцип построения элементов GLV может быть востребован при создании дисплеев IMOD с возможностью решения указанных проблем.

Ещё одним примером применения описанной технологии является оптический лидар — устройство, в котором падающий на поверхность поток монохроматического света отражается с заданным распределённым по поверхности сдвигом фаз. Это распределение осуществляется за счёт смещения на определённое расстояние (меньше длины волны) каждой из множества отражающих свет мембран.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Косцов Э. Г.** Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики // Автометрия. 2009. **45**, № 3. С. 3–52.
2. **Kostsov E. G.** Nanoelectromechanical systems, NEMS // Encyclopedia of Life Support Systems. Vol. Nanoscience and Nanotechnologies. UNESCO-EOLSS Publishers, 2010. P. 662–676.
3. **De Dobbelaere P., Falta K., Gloeckner S., Patra S.** Digital MEMS for optical switching // IEEE Commun. Mag. 2002. **40**, N 3. P. 88–95.
4. **Chu P. B., Lee S.-S., Park S.** MEMS: the path to large optical crossconnects // Ibid. P. 80–87.
5. **Syms R. R. A., Moore D. F.** Optical MEMS for telecommunications // Mater. Today. 2002. **5**, N 7. P. 26–35.
6. **Chang C.-P.** MEMS for telecommunications: devices and reliability // Proc. of the IEEE 2003 Custom Integrated Circuits Conference. P. 199–206.

7. **Hoffmann M., Voges E.** Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems // *Journ. Micromech. Microeng.* 2002. **12**, N 4. P. 349–360.
8. **Laszczyk K., Bargie S., Gorecki C. et al.** Two directional electrostatic comb-drive X-Y micro-stage for MOEMS applications // *Sensors and Actuators A: Physical.* 2010. **163**, N 1. P. 255–265.
9. **Zhang C., You Z., Huang H., Li G.** Study on a two-dimensional scanning micro-mirror and its application in a MOEMS target detector // *Sensors.* 2010. **10**, N 7. P. 6848–6860.
10. **Wu M. C., Solgaard O., Ford J. E.** Optical MEMS for lightwave communication // *Journ. Lightwave Technol.* 2006. **24**, Is. 12. P. 4433–4454.
11. **Luo C., Goossen K. W.** Optical microelectromechanical system array for free-space retro communication // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2004. **16**, N 9. P. 2045–2047.
12. **Castracane J., Yan D., Madison S. et al.** Low power MOEMS components for active optical systems // *Journ. Microlithog., Microfab., Microsyst.* 2005. **4**, N 4. 041702.
13. **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.
14. **Cai D., Yao J., Jiang W.** Optical efficiency of MEMS deformable mirror for adaptive optics // *Ibid.* 72090Q.
15. **Diouf A., Stewart J. B., Cornelissen S. A., Bifano T. G.** Development of through-wafer interconnects for MEMS deformable mirrors // *Intern. Journ. Optomechatronics.* 2010. **4**, Is. 3. P. 237–245.
16. **Helmbrecht M. A., He M., Kempf C. J.** Development of high-order segmented MEMS deformable mirrors // *Proc. SPIE.* 2012. **8253**. 825307.
17. **Jungwirth M. E. L., Wick D. V., Dereniak E. L.** Theory and design of a MEMS-enabled diffraction limited adaptive optical zoom system // *Proc. SPIE.* 2012. **8373**. 83730T.
18. **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.
19. **Evans J. W., Macintosh B., Poyneer L. et al.** Demonstrating sub-nm closed loop MEMS flattening // *Opt. Express.* 2006. **14**, N 12. P. 5558–5570.
20. **Rondi A., Extermann J., Weber S. M. et al.** MEMS for femtosecond pulse shaping applications // *Proc. SPIE.* 2009. **7209**. 72090A.
21. **Yano M., Yamagishi F., Tsuda T.** Optical MEMS for photonic switching — compact and stable optical cross connect switches for simple, fast and flexible application in recent photonic networks // *IEEE Journ. Sel. Top. Quant. Electron.* 2005. **11**, Is. 2. P. 383–394.
22. **Wu M. C.** Current trends in optical MEMS // *Optical Fiber Communication Conference.* 2005, University of California, Berkeley, EECS Department & Berkeley Sensor and Actuator Center. URL: <http://www.eecs.berkeley.edu/wu/Presentations/ofc2005.pdf> (дата обращения: 11.03.2013).
23. **Hassan S. M.** Optical MEMS: The convergence of electronic and mechanical functionalities in an optical device // *Summer School on Optoelectronics, Lasers and Applications, 2008.* URL: <http://olaschool.chania.teicrete.gr/lectures2008/Optical MEMS - Dr Hassan.pdf> (дата обращения: 11.03.2013).
24. **Bloom D. M.** The Grating Light Valve: revolutionizing display technology // *Proc. SPIE.* 1997. **3013**. P. 165–171.

25. **Corrigan R. W., Amm D. T., Gudeman C. S.** Grating Light Valve technology for projection displays // Proc. of the International Display Workshop. Kobe, Japan, 9 Dec., 1998. Paper Number LAD5-1.
26. **Corrigan R. W., Amm D. T., Alioshin P. A. et al.** Calibration of a scanned linear Grating Light Valve projection system // SID Symposium Digest of Technical Papers. 1999. **30**, Is. 1. P. 220–223.
27. **Corrigan R., Cook R., Favotte O.** Silicon Light MachinesTM — Grating Light ValveTM technology brief. Breakthrough MEMS component technology for optical networks // Silicon Light Machines. URL: <http://www.siliconlight.com/wp-content/themes/siliconlight/pdf/pw99.pdf> (дата обращения: 11.03.2013).
28. **Payne A. P., Staker B. P., Gudeman C. S. et al.** Resonance measurements of stresses in Al/Si₃N₄ microribbons // Proc. SPIE. 1999. **3880**. P. 90–100.
29. **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.
30. **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.
31. **Adiyan U., Erarslan R. B., Ferhanoglu O. et al.** Diffraction grating-based optical readout for thermal imaging // Proc. SPIE. 2012. **8550**. 855026.
32. **Amm D. T., Corrigan R. W.** Optical performance of the Grating Light Valve technology // Silicon Light Machines. URL: <http://www.siliconlight.com/wp-content/themes/siliconlight/pdf/pw99.pdf> (дата обращения: 11.03.2013).
33. **Tamak E., Hashimoto Y., Leung O.** Computer-to-plate printing using the Grating Light ValveTM device // Proc. SPIE. 2004. **5348**. P. 89–97.
34. **Senturia S. D., Day D. R., Butler M. A., Smith M. C.** Programmable diffraction gratings and their uses in displays, spectroscopy, and communications // Journ. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2005. **4**, N 4. 041401.
35. **Yun S. K., Song J. H., An S. D. et al.** A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications // Proc. SPIE. 2008. **6887**. 688702.
36. **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.
37. **Verheggen J., Panaman G., Castracane J.** Characterization and fabrication of MOEMS-based diffractive optical switching elements // Proc. SPIE. 2006. **6114**. P. 139–147.
38. **Zamkotsian F., Timotijevic B., Lockhart R. et al.** Optical characterization of fully programmable MEMS diffraction gratings // Opt. Express. 2012. **20**, Is. 23. P. 25267–25274.
39. **Zamkotsian F., Lanzoni P., Viard T., Buisset C.** New astronomical instrument using MOEMS-based programmable diffraction gratings // Proc. SPIE. 2009. **7208**. 72080I.
40. **Viard T., Buisset C., Rejeaunier X. et al.** Programmable spectrometer using MOEMS devices for space applications // Proc. SPIE. 2008. **7010**. 701048.
41. **Suresh V. G., DasGupta N., Bhattacharya S.** Tunable MEMS diffraction gratings // Proc. SPIE. 2012. **8549**. 854918.
42. **Нагибина И. М.** Интерференция и дифракция света. М.: Машиностроение, 1974. 360 с.
43. **Losoya-Leal A., Camacho-Leon S., Martinez-Chapa S. O.** Design of a CMOS-MEMS diffraction grating for near-infrared spectroscopy of biomolecules // Proc. of the 2010 IEEE

Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Washington, USA: IEEE Computer Society, 2010. P. 737–740.

44. **Косцов Э. Г., Фадеев С. И.** Новые микроэлектромеханические резонаторы для гигагерцовых частот // Автометрия. 2013. **49**, № 2. С. 115–122.
45. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 916 с.
46. **Kostsov E. G.** Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures // Ferroelectrics. 2005. **314**, N 1. P. 169–187.
47. **Kostsov E. G.** Ferroelectric-based electrostatic micromotors with nanometer gaps // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency Control. 2006. **53**, N 12. P. 2294–2299.
48. **Соболев В. С., Кащева Г. А.** Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. **44**, № 6. С. 49–65.
49. **Косцов Э. Г., Соболев В. С.** Низковольтный элемент программируемой полем динамической дифракционной решётки // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 101–109.

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.
