

12. Микрзеркальный ПВМС как голографический носитель: новейшие возможности и применения

Р. С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Доклад посвящён рассмотрению современных возможностей применения микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света в качестве средства ввода компьютерно синтезированных и цифровых голограмм. Рассматриваются особенности модуляции света, осуществляемой микрзеркальными модуляторами, приводятся и обсуждаются примеры реализации голограмм различных типов с их помощью, а также голографических систем различного назначения на их основе.

Ключевые слова: Микрзеркальный пространственно-временной модулятор света, Модуляция света, Компьютерно синтезированная голограмма, Цифровая голограмма, бинаризация голограмм, Оптико-цифровые системы, Оптическая обработка информации.

Цитирование: Стариков, Р. С. Микрзеркальный ПВМС как голографический носитель: новейшие возможности и применения / Р. С. Стариков // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 81–86.

Введение

Технология микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света (МЗ ПВМС) с начала 70-х гг прошлого века получила значительное и впечатляющее развитие, в результате которого МЗ ПВМС стали технологически освоенным и массово выпускаемым прибором, нашедшим значительное количество практических применений [1–3]. Достаточно высокие пространственно-частотные характеристики современных МЗ ПВМС и, главное, их очень высокое быстродействие, недостижимое в ближайшей перспективе для ПВМС других существующих типов, определили интерес к использованию МЗ ПВМС в оптико-цифровых голографических системах. Обсуждение возможностей такого использования предлагается в настоящем докладе, для чего будут рассмотрены характеристики и особенности модуляции МЗ ПВМС, представлены варианты реализации голограмм различных типов с помощью МЗ ПВМС, а также приведены оптико-цифровых голографических систем на базе МЗ ПВМС.

1. Особенности модуляции света, осуществляемой современными МЗ ПВМС

Современные серийные МЗ ПВМС имеют размер пиксела — поворотного зеркала — немногим более десяти мкм при этом, на настоящее время технологически доступно разрешение в единицы Мпикс. Каждое поворотное зеркало МЗ ПВМС управляется двоичным электрическим сигналом и имеет два стабильных положения, соответствующих «0» и «1» светового сигнала пиксела — по направлению отражения. Таким образом, МЗ ПВМС осуществляется бинарная

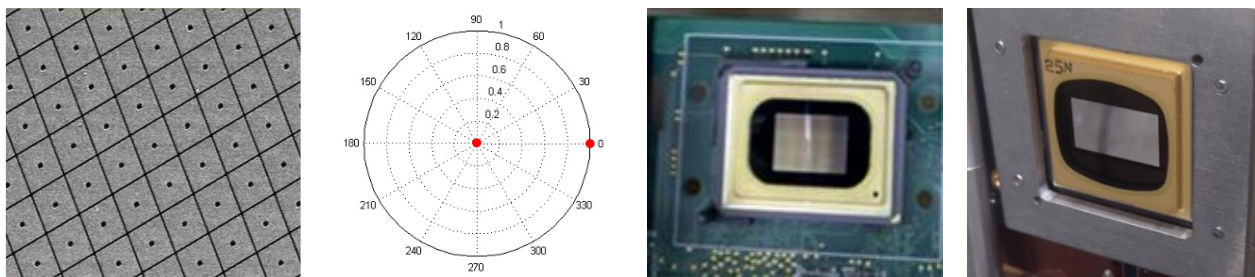


Рис. 1. МЗ ПВМС Texas Instruments, слева направо: увеличенное изображение микрозеркал поверхности чипа, модуляционная диаграмма МЗ ПВМС, модель DLP7000 разрешение 1024×768 пикс, частота смены кадра свыше 30 кГц, модель Discovery DLP9500BFLN, разрешение 1920×1080 пикс, частота смены кадра свыше 20 кГц

пространственная модуляция распределения амплитуды света; впрочем, следует заметить, недавно появились сообщения и об экспериментальных разработках по развитию данной технологии для построения чисто фазового МЗ ПВМС [4], успешное развитие этого направления открыло бы новые возможности для голографических систем. Рисунок 1 представляет современные серийные образцы МЗ ПВМС, осуществляющие высокоскоростную бинарную амплитудную модуляцию.

Важным достоинством модуляции, осуществляемой МЗ ПВМС является естественное отсутствие временных флуктуаций сигнала пиксела за время кадра, присущих, например, жидкокристаллическим ПВМС. Существенной проблемой применения МЗ ПВМС является наличие той или иной степени неплоскостности рабочего отражающего поля системы, определяющаяся качествами собственно чипа с микрозеркалами и поверхности окна корпуса микросхемы и приводящая к пространственным фазовым искажениям модулированного сигнала.

Скорость переключения положения каждого зеркала, в нынешнем технологическом пределе может быть очень высока, следует отметить, что в настоящее время скорость смены всего кадра модулятора ограничена, в большей степени, возможностями управляющего электронного интерфейса. В весьма вероятной перспективе же для МЗ ПВМС — достижение возможности ввода изображений размерностей Мпикс с частотами кадра до МГц. В настоящее же время для лучших серийных устройств обеспечивается скорость ввода на уровне двух-трёх десятков кГц, таким образом, можно говорить о доступности скорости ввода информации с помощью МЗ ПВМС на уровне десятков Гбит/с.

2. Применение МЗ ПВМС для реализации голограмм

На сегодняшний день известен целый ряд работ, посвящённых применению МЗ ПВМС для реализации голограмм [5, 6]. Значительное количество усилий в этой области сосредоточено на реализации компьютерно синтезированных и цифровых голограмм, что вызвано очевидными потребностями практики. Бинарный характер модуляции МЗ ПВМС определяет необходимость бинарного представления отсчётов реализуемой с его помощью голограммы — со всеми хорошо известными соответствующими проблемами качества восстанавливаемого светового распределения. Для решения этих проблем возможно применение таких подходов,



Рис. 2. К бинаризации и мультиплицированию голограмм. Верхний ряд: слева численно восстановленное с компьютерно синтезированной голограммы Фурье изображение; справа изображение, численно восстановленное с той же голограммы Фурье, бинаризованной методом Бредли. Нижний ряд: результат оптического восстановления бинаризованной голограммы выведенной на МЗ ПВМС и результат оптического восстановления такой же мультиплицированной голограммы, выведенной на МЗ ПВМС (использован МЗ ПВМС Discovery DLP9500BFLN)

как бинаризация голограммы, применения бинарного растривания отсчётов голограммы, применение методов мультиплицирования голограммы [7–12]; некоторые соответствующие примеры приведены на рисунке 2. На настоящий момент очевидно, что выбор способа бинарного представления определяется типом голограммы и требованиями функционала системы, для которой она реализуется. Так, для реализации внеосевых цифровых голограмм, формирующих полутоновое изображение, лучшие результаты показывают не те же методы бинаризации, что обеспечивают наилучшую реализацию комплексного импульсного отклика системы пространственной фильтрации [7–9] и т. п. В последнем случае разные методы бинаризации оказываются по-разному успешны при реализации разных типов пространственных фильтров или, например, при фильтрации контурных и полутоновых изображений [8, 9].

Применение методов бинарного растривания и мультиплицирования голограмм позволяют добиться весьма точного воспроизведения амплитуды и фазы восстанавливаемого распределения исходной голограммы, при этом имеет место компромисс между качеством восстанавливаемого светового распределения и размером голограммы, ограниченным размерностью устройства ввода. Практика показывает что, например, для голограммы Фурье

приемлемая точность восстановления достигается при числе передаваемых растром градаций пропускания 10, а для высокой точности необходимо 17 и более; для этого требуется использование соответственно 9 и 16 пикселей МЗ ПВМС при передаче одного отсчёта голограммы [8]. Для избавления от кратных дифракционных порядков, а также для сепарации пространственного шума возможно успешное применение различных вариантов стохастического раstra [8]. Мультиплицирование голограмм [10–12] также весьма привлекательно, особенно при воспроизведении распределения интенсивности, методы мультиплицирования в настоящее время весьма разработаны и опробованы в широкой мировой практике.

Также, говоря о голографических применениях МЗ ПВМС, стоит отдельно упомянуть возможности их применения для оперативной записи цифровых или компьютерно синтезированных голограмм на фоточувствительных материалах, в этом случае МЗ ПВМС используется, фактически, как средство ввода некоторого проекционного устройства [13].

3. Оптико-цифровые голографические системы на базе МЗ ПВМС

На настоящий момент в литературе представлено значительное количество исследований, посвящённых построению на основе МЗ ПВМС различных оптико-цифровых дифракционных и голографических систем, таких как системы формирования лазерных пучков, системы формирования двумерных и трёхмерных изображений, системы кодирования данных, системы обработки изображений [14–18]. В ряде таких систем МЗ ПВМС используется как голографический носитель, в том числе обеспечивающий восстановление полного комплексного поля. В частности, например, не так давно представлена голографическая система, обеспечивающая полную комплексную пространственную модуляцию света [14], применённая схема типична для подобных систем и базируется на двух ПВМС — фазовом жидкокристаллическом и амплитудном бинарном МЗ ПВМС.

Конечно же, в наибольшей степени скоростные свойства МЗ ПВМС привлекательны для использования в системах пространственной фильтрации, предназначенных для обработки информации. В частности, уже представлены высокоскоростные когерентные корреляторы изображений, реализованные на МЗ ПВМС [15, 16], в [17] экспериментально исследуются возможности создания с использованием МЗ ПВМС коррелятора с пространственно-некогерентным освещением, а в [18] на базе МЗ ПВМС реализована высокоскоростная система оптического кодирования двоичной информации.

Для формирования необходимого импульсного отклика систем пространственной фильтрации, базирующихся на МЗ ПВМС возможно применение различных методов компьютерного синтеза голограмм, в частности с особенностями реализации, обсуждаемыми в предыдущем разделе настоящего доклада. Особо стоит отметить, что для применения в системах пространственной фильтрации, таких как, например, корреляторы, весьма привлекательным представляется метод оптимальной проекции. Идея метода состоит в нахождении оптимальной проекции требуемого комплексного импульсного отклика системы на модуляционную

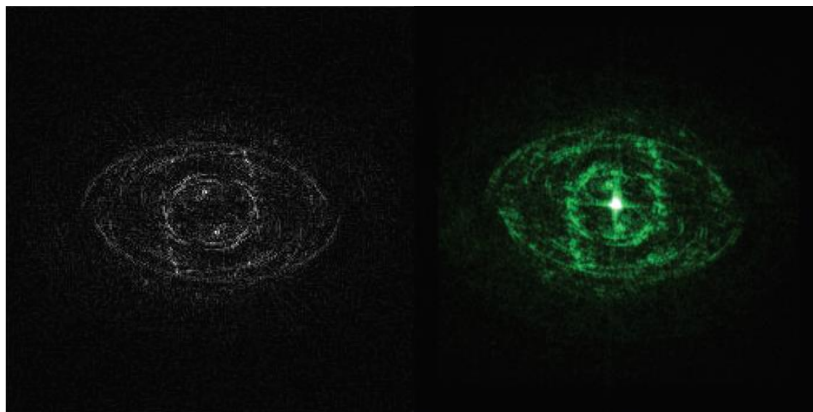


Рис. 3. Отклик бинарной голограммы Фурье инвариантного корреляционного фильтра с минимумом шума и энергии корреляции для схемы когерентного $4f$ -коррелятора, полученной методом оптимальной проекции с использованием алгоритма градиентного спуска: слева — расчёт, справа — эксперимент

характеристику МЗ ПВМС. Этого можно добиться, применяя различные способы оптимизации для расчёта бинарной голограммы, математические основы таких способов в настоящее время весьма развиты и широко применяются в различных областях. Любопытно, что в некоторых случаях применение пространственного фильтра, полученного с использованием оптимальной проекции, обеспечивает лучшие результаты работы системы фильтрации (например, качества корреляционного распознавания), чем допускал тот исходный фильтр, для которого эта проекция искалась. Пример реализации импульсного отклика $4f$ коррелятора, соответствующего инвариантному корреляционному фильтру, выполненной с помощью алгоритма градиентного спуска представлен на рисунке 3 [9].

В целом, говоря о системах пространственной фильтрации можно выделить две важнейшие современные тенденции исследований: 1) наращивание производительности систем за счёт применения всё более высокоразрешающих и быстродействующих ПВМС и 2) применение систем пространственной фильтрации в сочетании с методами искусственного интеллекта. Безусловно, МЗ ПВМС уже сейчас обеспечивают экстремальную по нынешним меркам пропускную способность — на уровне десятков гигабит в секунду и выше. С другой стороны, в настоящее время представляются очевидными новые широкие возможности обработки информации, которые открывает нахождение удачных сочетаний алгоритма работы интеллектуальной системы, основанной на пространственной фильтрации и особенностей модуляции света, применяемой в ней. Наконец, следует отметить, что системы пространственной фильтрации с МЗ ПВМС в качестве устройств ввода в настоящее время могут быть реализованы в миниатюрном, интегральном исполнении, например, при замене линз на дифракционные элементы.

Заключение

Достоинства и проблемы применения МЗ ПВМС как голографического носителя, рассматриваемые в докладе, для обсуждения в краткой форме представлены таблице 1.

Табл. 1. МЗ ПВМС как голографический носитель

Достоинства	Проблемы
Чрезвычайно высокая скорость ввода	Весьма дорогой электронный интерфейс, обеспечивающий высокую скорость ввода
Малый размер пиксела	Для ряда задач голографии пространственные характеристики недостаточны
Большое количество пикселов	
Бинарный характер модуляции обеспечивает возможность достижения чрезвычайно высокого контраста при вводе	Бинарный характер модуляции определяет шумы бинаризации в восстановленном световом распределении
Полный контроль состояния — за время отображения кадра нет флуктуаций в отсчётах	Фазовые искажения по полю — технологически обусловленные, в ряде случаев неустранимые

Несмотря на бинарный характер амплитудной модуляции и относительно невысокое разрешение МЗ ПВМС могут с успехом применяться в ряде голографических приложений, что демонстрируется рядом удачных исследований, выполненных в мире начиная с середины 2000-х гг. Выдающаяся же скорость ввода информации, обеспечиваемая МЗ ПВМС, делает их наиболее привлекательным средством модуляции для оптико-цифровых систем обработки информации, основанных на пространственной фильтрации, в том числе, строящихся с использованием принципов искусственного интеллекта. Следует заключить, что технология МЗ ПВМС — одна из немногих существующих технологий, открывающих возможность обработки информации с пропускной способностью на уровне десятков, а в перспективе сотен гигабит в секунду.

Список источников

- [1] URL: www.ti.com/dlp-chip/overview.html.
- [2] **Patent 3746911 US.** Electrostatically deflectable light valves for projection displays / H. Nathanson, J. Davis. — 17.07.1973.
- [3] **Hornbeck, L. J.** Digital Light Processing™ and MEMS: An Overview / URL: www.ti.com/pdfs/dlpdmd/107_DLP_MEMS_Overview.pdf.
- [4] **Bartlett, T. A.** Adapting Texas Instruments DLP technology to demonstrate a phase spatial light modulator / T. A. Bartlett, W. C. McDonald, J. N. Hall // Proc. of SPIE. — 2019. — Vol. 10932. — P. 109320S
- [5] **Park, M.-C.** Properties of DMDs for holographic displays / M.-C. Park, B.-R. Lee, J.-Y. Son, O. Chernyshov // Journal of Modern Optics. — 2015. — Vol. 62. — № 19. — P. 1600–1607.