

# ОВФ низкоинтенсивного лазерного излучения в схеме с тонкой динамической голограммой и телевизионной передачей интерферометрической информации

А.А.Лещев, В.А.Беренберг, М.В.Васильев, В.Ю.Венедиктов,  
Н.Л.Иванова, Ю.А.Петрушин, П.М.Семенов, Н.Н.Фрейганг

*Представлены результаты исследований системы ОВФ на основе тонкого динамического голографического корректора, записываемого в оптически адресуемом жидкокристаллическом пространственном модуляторе света с использованием телевизионного тракта для переноса интерферометрической информации с ПЗС-матрицы на фотопроводник пространственного модулятора света.*

**Ключевые слова:** жидкий кристалл, пространственный модулятор света, динамическая голография, коррекция искажений, обращение волнового фронта.

Методы обращения волнового фронта (ОВФ) оптического излучения, которые нашли применение в лазерной технике, основаны, как правило, на записи объемных (толстых) динамических голограмм с использованием разнообразных нелинейно-оптических эффектов [1]. Это приводит к ряду ограничений, накладываемых на спектральный состав, когерентность и интенсивность лазерного излучения. В результате применение данных методов ОВФ для решения ряда важных практических задач, связанных с использованием частично когерентного и немонахроматического излучения низкой интенсивности, проблематично.

В ряде работ показано, что тонкие динамические голографические корректоры (ГК), записываемые в оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторах света (ОА ЖК ПМС) [2], обеспечивают качественную коррекцию оптических искажений в оптических элементах наблюдательных оптических систем [3–6]. При использовании таких ГК отсутствуют жесткие ограничения, связанные со спектральной и угловой селективностью голограммы, длительностью оптических пучков и временем записи и считывания голограмм.

Дифракционная эффективность ГК зависит от способа его записи. При прямом методе записи ГК, когда она осуществляется в результате интерференции плоской (или сферической) опорной и сигнальной волн на слое фотопроводника ОА ЖК ПМС, записывается, как правило, решетка с почти симметричным профилем штриха. Теоретическое значение дифракционной эффективности такого ГК на основе тонкой динамической голограммы не превышает 30%–40%. В реальности из-за неизбежных потерь света в элементах модулятора дифракционная эффективность оказывается еще меньше. Это яв-

ляется недостатком прямого метода записи ГК, который использовался в работах [3–6]. Данный недостаток может быть преодолен усложнением схем записи ГК [7, 8], которое позволяет записывать динамические голографические решетки с асимметричным профилем штриха. Известно, что решетка с пилообразным профилем штриха и амплитудой  $2\pi$  имеет дифракционную эффективность 100%.

В работах [3–7] тонкие динамические ГК, записанные в ОА ЖК ПМС, использовались в схеме однопроходной коррекции оптических искажений в элементах наблюдательных оптических систем. Вследствие несовершенства оптической системы световой пучок, несущий информацию об изображении удаленного объекта, искажается. В ГК записывается голограмма этих искажений. В результате при прохождении светового пучка через ГК искажения вычитаются, и оптическая система с ГК дает неискаженное изображение объекта.

В настоящей работе используются ГК, записываемые в ОА ЖК ПМС, для ОВФ непрерывного низкоинтенсивного лазерного излучения. Для записи ГК применялась схема с телевизионной передачей интерферометрической информации с ПЗС-матрицы на ОА ЖК ПМС, являющаяся упрощенным (без формирования асимметричного профиля штриха ГК) вариантом схемы, предложенной в [7].

Суть метода записи ГК [7] состоит в следующем. Картина интерференции опорной и сигнальной волн регистрируется ПЗС-матрицей, оцифровывается и подвергается компьютерной обработке, при которой форма интерференционных полос сохраняется, но симметричный профиль модуляции интенсивности заменяется асимметричным пилообразным. Обработанная таким образом интерферограмма воспроизводится на жидкокристаллическом дисплее и оптическим способом ретранслируется на ОА ЖК ПМС. В последнем записывается ГК с асимметричным пилообразным профилем штриха.

Этот способ записи был выбран нами потому, что, кроме возможности достижения высокой дифракционной эффективности [7], он позволяет решить другую актуальную для ОА ЖК ПМС проблему – продвижение в ближний и средний ИК диапазоны длин волн. В настоящее время по совокупности параметров (пространствен-

А.А.Лещев, В.А.Беренберг, М.В.Васильев, В.Ю.Венедиктов, Н.Л.Иванова, Ю.А.Петрушин, П.М.Семенов, Н.Н.Фрейганг. Институт лазерной физики – Научно-производственная корпорация «Государственный оптический институт им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12; e-mail: venediktov@pochta.ru, vlad.venediktov@mail.ru

ное разрешение, глубина модуляции фазы, быстродействие) наилучшие результаты достигнуты в ОА ЖК ПМС в видимом диапазоне длин волн записи. В диапазоне 0.8–1 мкм характеристики ОА ЖК ПМС существенно хуже, а продвижение в более длинноволновой диапазон и вовсе проблематично. При выбранной схеме записи ГК эта проблема отсутствует, т. к. запись интерференционной картины и перенос ее на ОА ЖК ПМС осуществляются на разных и не связанных между собой длинах волн. Записанные таким образом ГК могут использоваться во всем спектральном диапазоне прозрачности элементов ОА ЖК ПМС.

Схема экспериментальной установки для исследования ОВФ представлена на рис.1. Излучение лазера 1 (записывающего) разделялось на опорный и сигнальный пучки. Сигнальный пучок проходил через искажающий оптический объект (аббератор) 11 и в плоскости ПЗС-матрицы 10 интерферировал с опорным сигналом. Картина интерференции, преобразованная в компьютере и воспроизведенная на жидкокристаллическом дисплее 21, транслировалась на фоточувствительный слой ОА ЖК ПМС 17. Пучок излучения лазера 2 (считывающего) направлялся на ПМС со стороны жидкокристаллического слоя, вносящего в его волновой фронт соответствующую модуляцию фазы. В работе использовался ОА ЖК ПМС отражательного типа с внутренним зеркалом, пространственно разделяющим каналы записи и считывания ГК.

Световая волна, продифрагировавшая на этом ГК в минус первый порядок, имела волновой фронт, обращенный по отношению к искаженной сигнальной волне, использовавшейся при записи ГК. После прохода через аббератор внесенные им искажения вычитались и на выходе системы формировался пучок с высоким оптическим качеством.

В качестве жидкокристаллического дисплея 21 использовался коммерчески доступный мультимедийный проектор Canon LV-S1. Воспроизводимое компьютером изображение интерференционной картины строилось указанным проектором на рассеивающем белом экране 19. Это изображение, в свою очередь, проецировалось высококачественным репродукционным объективом 18 на плоскость ПМС.

В отличие от традиционных схем ОВФ, где используются нелинейно-оптические эффекты [1], в рассматриваемой схеме отсутствует автоматическое воспроизведение обращенной волны при дифракции считывающей волны на голограмме. Для получения ОВФ необходимо добиться поперечного пространственного совмещения в плоскости ОА ЖК ПМС искаженного волнового фронта пробной волны и изображения интерференционной картины, используемой для записи ГК. Для компенсации «плавных» искажений (типа искажений, вносимых линзой) точность совмещения должна быть относительно небольшой (200–300 мкм). При компенсации случайных

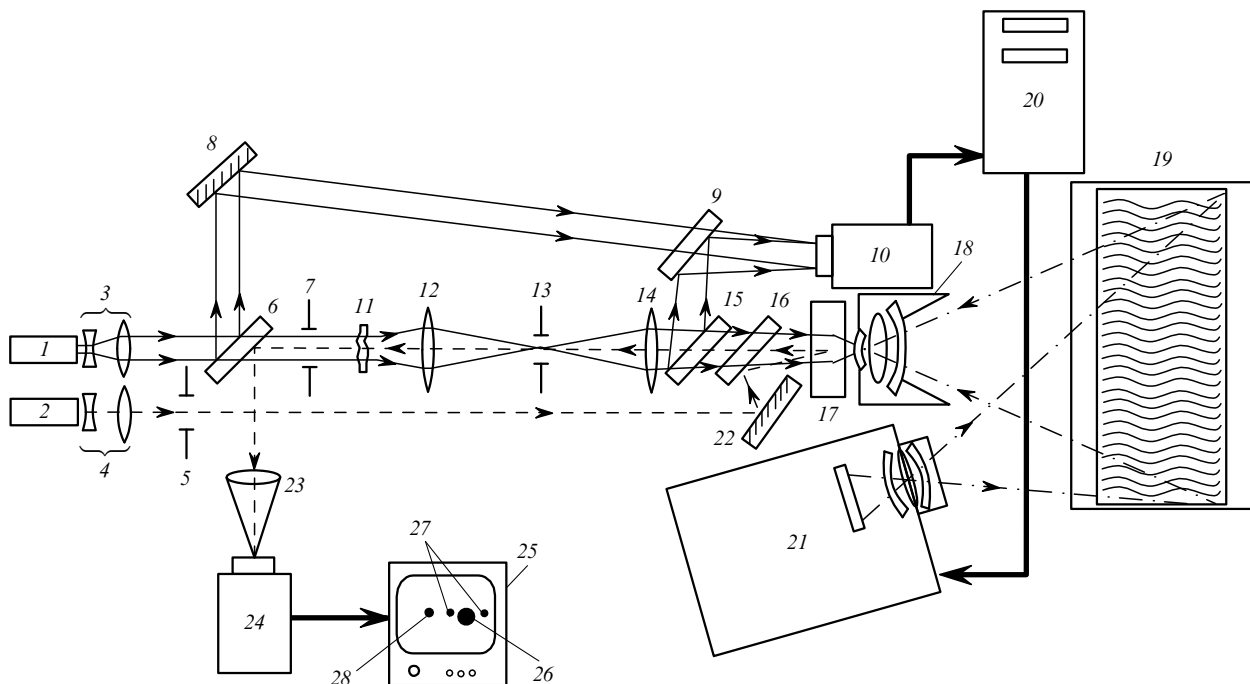


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – He-Ne-лазер для записи ГК; 2 – He-Ne-лазер для восстановления ГК; 3, 4 – телескопы, расширяющие лазерный пучок; 5, 7, 13 – диафрагмы; 6, 9, 15, 16 – плоскопараллельные светоделительные пластины; 8, 22 – зеркала; 10, 24 – ПЗС-матрицы; 11 – аббератор; 12, 14 – линзы телескопа, передающие изображение плоскости аббератора в плоскость ГК и в плоскость, сопряженную плоскости ПЗС-матрицы для записи интерференционной картины; 17 – ОА ЖК ПМС для записи ГК; 18 – объектив, строящий на ОА ЖК ПМС изображение экрана 19; 20 – компьютер; 21 – мультимедийный проектор; 23 – линза; 25 – монитор для просмотра сигнала с ПЗС-матрицы 24; 26 – изображение пучка, отраженного от ОА ЖК ПМС в нулевой порядок дифракции; 27 – изображения пучков, сформированных при френелевских отражениях от модулятора; 28 – изображение пучка, отраженного в минус первый порядок дифракции; ход лучей показан стрелками; сплошные линии – пучки излучения He-Ne-лазера, используемые для записи интерферограммы аббератора на ПЗС-матрице, штрих-пунктирные линии – пучки немонахроматического излучения мультимедийного проектора, используемого для воспроизведения интерференционной картины в плоскости ОА ЖК ПМС, штриховые линии – пучки излучения He-Ne-лазера, используемого для восстановления динамической голограммы (с ОВФ по отношению к пучку лазера 1) и для визуализации коррекции искажений аббератора на мониторе 25.

мелкомасштабных фазовых искажений необходимая точность совмещения возрастает. Для использовавшегося в эксперименте аберратора указанная точность составляла около 30 мкм. Такое совмещение в наших экспериментах осуществлялось с помощью внутренних электронных регулировок мультимедийного проектора, которые позволяли подбирать масштаб и положение изображения интерференционной картины на фоточувствительном слое ПМС, а также корректировать проективные искажения изображения.

В качестве аберраторов использовались различные оптические элементы: оптические клинья, отклоняющие пучок от его первоначального направления на угол до  $3 \times 10^{-3}$  рад; сферическая линза, увеличивающая расходимость пучка до  $\sim 4 \times 10^{-3}$  рад ( $\sim 27$  дифракционных углов); цилиндрическая линза, увеличивающая расходимость пучка до  $\sim 6.7 \times 10^{-3}$  рад ( $\sim 45$  дифракционных углов); травленая в плавиковой кислоте стеклянная пластина, увеличивающая расходимость волнового пучка по сравнению с дифракционной примерно в 50 раз. Интерферограммы светового пучка в отсутствие аберраторов и пучков, прошедших через линзы и травленную стеклянную пластину, представлены на рис.2–4. Поперечный размер этих интерферограмм на ПЗС-матрице 10 и в плоскости ПМС 17 составлял 4 мм.

При использовании в качестве аберраторов линз и травленной стеклянной пластины происходило значительное увеличение угловой расходимости сигнального пучка. Критерием наличия ОВФ-компенсации искажений аберратора служил анализ изображений дальней зоны скорректированного пучка, сформированного линзой 23 в плоскости вспомогательной ПЗС-матрицы 24. Одно-

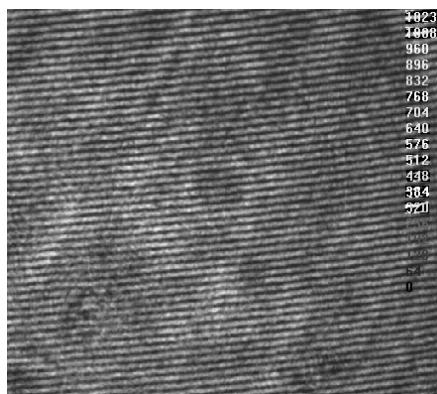


Рис.2. Структура ГК в отсутствие аберратора.

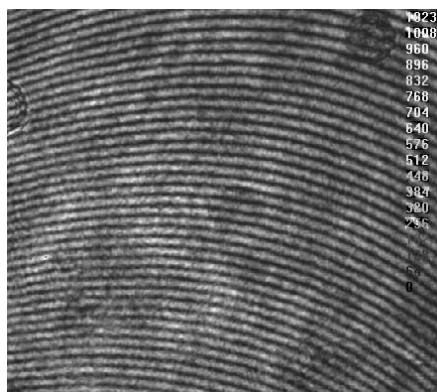


Рис.3. Структура ГК; аберратор – сферическая линза.

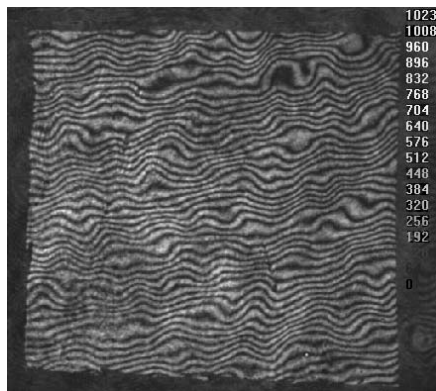


Рис.4. Структура ГК; аберратор – травленая стеклянная пластина.



Рис.5. Дальняя зона искаженного и исправленного пучков; аберратор – сферическая линза.

временно с дальней зоной пучка с исправленным фронтом на той же ПЗС-матрице фиксировалась и дальняя зона искаженного пучка, для чего использовался френелевский блик считывающего пучка от поверхности ОА ЖК ПМС. На рис.5–7 показаны примеры подобного рода изображений. Яркая точка в центре снимков соответствует пучку с ОВФ после компенсации искажений с расходимостью, близкой к дифракционной.

В наших экспериментах мы могли наблюдать коррекцию искажений в динамическом режиме. Так, при введении в схему клина (элемент 11 на рис.1) изображение дальней зоны светового пучка на экране монитора сначала «перескакивало» в положение, соответствующее его отклонению клином. По завершении процесса перезаписи ГК (десять доли секунды) изображение дальней зоны возвращалось в исходное положение. При перемещениях линзовых аберраторов со скоростями, не превышающими



Рис.6. Дальняя зона искаженного и исправленного пучков; аберратор – цилиндрическая линза.

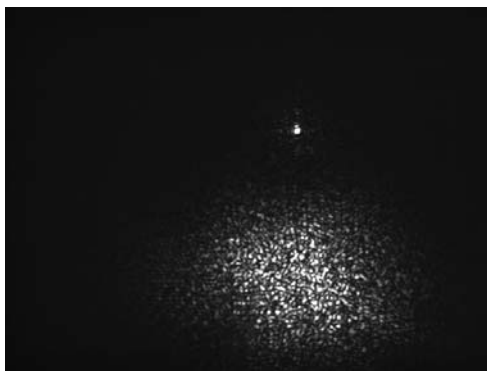


Рис.7. Дальняя зона искаженного и исправленного пучков; аббератор – травленая стеклянная пластина.

ми 0.2–0.3 мм/с, на экране наблюдались непрерывное движение искаженного пучка и неподвижная яркая точка, соответствующая волне с ОВФ. При увеличении скорости перемещения линз обращенная волна исчезала.

Таким образом, экспериментально подтверждены работоспособность схемы записи динамического ГК с компьютерно-телевизионной передачей интерферометрической голограммы и ее применимость для ОВФ излучения маломощного непрерывного лазера. Следует отметить, что запись интерферометрической информации

на ПЗС-матрице и формирование волны с ОВФ могут осуществляться взаимно некогерентными лазерами. Спектральный диапазон работы лазеров и чувствительность к излучению в рассматриваемой схеме ОВФ целиком и полностью определяются соответствующими характеристиками используемой фотоприемной матрицы.

В заключение авторы благодарят Н.А.Феоктистова за участие в изготовлении использовавшегося в эксперименте ОА ЖК ПМС.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МНТЦ (проекты № 2113 и 2101р).

1. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
2. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. *Пространственные модуляторы света* (М.: Радио и связь, 1987).
3. Berenberg V.A., Leshchev A.A., Vasil'ev M.V., Venediktov V.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3219**, 147 (1998).
4. Berenberg V.A., Leshchev A.A., Soms L.N., et al. *Opt. Commun.*, **166**, 181 (1999).
5. Berenberg V.A., Leshchev A.A., Semenov P.M., et al. *Mol. Cryst. Liquid Cryst.*, **351**, 9 (2000).
6. Wick D.V., Martines T., Wood M.V., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 3798 (1999).
7. Percheron I., Baker J.T., Gruneisen M., et al. *Proc. 2nd Int. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine* (Singapore–New Jersey–London–Hong Kong: World Scientific, 1999, p. 384).
8. Беренберг В.А., Венедиктов В.Ю. *Оптич. журн.*, **68**, 34 (2001).