

Асимметризация профиля тонкой динамической голографической решетки в петле оптической обратной связи с телевизионным замыканием*

В.Ю.Венедиктов, Н.Л.Иванова, В.А.Ласкин, Н.Н.Фрейганг

Представлены результаты исследований системы записи динамической голографической решетки в оптически адресуемом жидкокристаллическом пространственном модуляторе света, обеспечивающей асимметризацию профиля решетки за счет применения оптической обратной связи (нелинейного или адаптивного интерферометра) с телевизионным замыканием петли обратной связи.

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

Динамическая голографическая коррекция искажений в оптических и лазерных системах (см., напр., [1]) является одним из эффективных методов современной адаптивной оптики. Принцип действия таких систем основан на следующем. Пробный пучок лазерного излучения пропускается через искажающуюся оптическую систему; вносимые ею искажения подлежат коррекции. Далее искаженный (сигнальный) пучок интерферирует с неискаженным опорным и записывает голограмму (статическую или динамическую), которая используется в качестве корректора вносимых указанной системой искажений. Такая коррекция сводится к восстановлению голограммы излучением, искаженным системой. Например, при изображении системой некоторого объекта изображению каждой из его точек соответствует световая волна, искаженная системой. При дифракции каждой из этих волн на голограмме-корректоре в -1 -й порядок искажения вычитаются и восстанавливается совокупность неискаженных световых волн, соответствующих неискаженному изображению объекта. Опыт исследований показал, что оптимальными для задач коррекции являются тонкие (плоские) динамические голограммы, свободные от ограничений угловой и спектральной селективности и потому пригодные для коррекции искажений в некотором поле зрения и в некоторой спектральной области вокруг длины волны излучения, записавшего голограмму-корректор (подробнее см. обзор [1]).

* Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

В.Ю.Венедиктов. Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 198504 С.-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., 3; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197376 С.-Петербург, ул. проф. Попова, 5; ФГУП НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12; e-mail: venediktov@pochta.ru, vlad.venediktov@mail.ru
Н.Л.Иванова, Н.Н.Фрейганг. ФГУП НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12
В.А.Ласкин. Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 198504 С.-Петербург, Петродворец, Ульяновская ул., 3

Поступила в редакцию 13 марта 2009 г., после доработки – 8 сентября 2009 г.

Наиболее подходящим подходом к записи таких тонких динамических голограмм оказалось применение так называемых оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света (ОА ЖК ПМС, [2]). Это сэндвичеобразные устройства, содержащие, в частности, слой ЖК и слой фотопроводника (ФП), к которым приложено напряжение. Под действием излучения проводимость слоя ФП возрастает, что приводит к росту напряжения, приложенного к слою ЖК, и, соответственно, к изменению двулучепреломления тонкого (несколько микрометров) слоя ЖК. Использование таких элементов позволяет, в частности, записывать эффективные тонкие динамические (перезаписываемые в реальном времени с максимальной частотой обновления 10–1000 Гц) голографические решетки.

Однако, как известно, при обычном «прямом» способе записи, т.е. при записи тонкой голографической решетки как картины интерференции двух лазерных пучков, ее дифракционная эффективность в $+1$ -й и -1 -й порядки дифракции не может превышать 33 % для синусоидального профиля или 40 % для прямоугольной решетки (меандра), что приводит к высоким потерям энергии в оптической системе при использовании такой голограммы в качестве корректора.

Решением этой проблемы является асимметризация профиля голографической решетки, широко используемая при создании разнообразных статических голограммных и дифракционных оптических элементов, известных также как киноформы (см, напр., монографию [3]). В частности, в случае использования фазовой пропускающей решетки, профиль которой имеет вид прямоугольных треугольников, а глубина модуляции фазы составляет 2λ , эффективность ее дифракции в $+1$ -й или -1 -й порядок может достигать 100 %. При этом, если общая структура интерференционной картины (голограммы), т.е. локальный период и направление полос, остается неизменной, то и структура поля, восстанавливаемого такой асимметризованной голограммой при дифракции в $+1$ -й или -1 -й порядок, остается в первом приближении такой же, как и при дифракции на исходной голограмме.

Применение такого приема возможно и в случае записи динамических решеток, в том числе и с переменным

по площади периодом, т. е. тонких фазовых голограмм. В экспериментах [4, 5] такая асимметризация осуществлялась с использованием цифровой процедуры преобразования интерференционной картины, записанной с помощью ПЗС-камеры, но следует заметить, что, поскольку цифровое преобразование связано с большим объемом вычислений и, следовательно, приводит к снижению быстродействия системы, оно пока не получило практического применения.

В работе [6] был предложен и исследован теоретически альтернативный подход к асимметризации профиля интерференционной картины. Он является аналоговым и основан на использовании для записи динамической голограммы так называемого нелинейного, или адаптивного, интерферометра, известного также как система с отрицательной оптической обратной связью. Такие интерферометры исследовались в ряде работ (см., напр., [7, 8]) в связи с задачей записи динамического фазового корректора, и обычно в них используются ОА ЖК ПМС с внутренним зеркалом, расположенным между слоями ЖК и ФП. Наличие зеркала позволяет разделить каналы записи и считывания и, в частности, реализовать схему, в которой для управления фазовым набегом в слое ЖК используется освещающая ФП картина интерференции двух световых волн, одна из которых ранее была пропущена через слой ЖК того же модулятора. В работах [7, 8] и ряде других было показано, что в этом случае в слое ЖК формируется профиль набега фазы, дополнительный к разности хода волновых фронтов, участвующих в управлении модулятором, который может, в частности, служить корректором искажений волнового фронта одного из этих пучков.

Предложенная в работе [6] схема записи динамической голограммы также основана на том, что один из записывающих ее пучков (несущественно – неискаженный опорный или несущий информацию сигнальный) до интерференции с другим пучком пропускается через слой ЖК модулятора, используемого для записи динамической голограммы. Теоретическое исследование и численное моделирование такой схемы, проведенные в [6], подтвердили, что в этом случае фазовый профиль картины интерференции записывающих волн (и, следовательно, динамической голограммы) за время, соответствующее двум-четырем временам обновления картины модуляции, превращается в пилообразный, а эффективность дифракции в +1-й или –1-й порядок достигает 100 %.

К сожалению, практическая реализация такой схемы оказывается весьма затруднительной. Одна из трудностей носит технический характер и заключается в необходимости точного пространственного совмещения в масштабе 1 : 1 фазового рельефа, формируемого на «передней» стороне модулятора в слое ЖК, и промодулированного им волнового фронта светового пучка, посылаемого на слой ФП на «задней» стороне модулятора. В работе [7] и ряде других для этого использовалась сложная в построении и негибкая изображающая оптическая система. В случае записи не фазового корректора, как в работе [7], а динамической голограммы [6], требования к точности изображения и к оптическому разрешению этой системы существенно возрастают, что делает ее построение еще более сложным.

Вторая трудность носит более фундаментальный характер. При записи голографической решетки в ОА ЖК ПМС в петле оптической обратной связи по схеме [6]

процесс записи является существенно динамическим. В течение времени установления асимметричного профиля в определенных зонах модулятора может наблюдаться немонокотное по времени изменение глубины фазового профиля. Заметим, что для записи подобных фазовых решеток с «серой» шкалой глубины фазовой модуляции применяются, как правило [1, 2, 4, 5], модуляторы, основанные на использовании так называемого S-эффекта (вариант известного эффекта Фредерикса) в нематическом ЖК. Эффект Фредерикса заключается в ориентации молекул ЖК в направлении электрического поля. При отключении или ослаблении поля релаксация молекул носит характер теплового распада. Таким образом, характер процессов ориентации и релаксации в этом случае существенно различен и они подчиняются разным временным законам. При немонокотном по времени изменении управляющего электрического поля это может приводить к гистерезисным эффектам и замыканию формируемой голографической решетки.

В настоящей работе нами исследована схема записи голографического корректора в петле ООС, в которой замыкание контура ООС осуществляется телевизионно-компьютерным методом [4, 5, 8, 9]. Применение такого способа переноса информации позволяет существенно упростить оптическую схему, а покадровая перезапись интерференционной картины исключает влияние гистерезисных явлений.

Итерационный процесс установления профиля решетки был численно смоделирован [10]. Модулятор моделировался как светуправляемая фазовая пластина, распределение набега фазы $\varphi(x, y)$ в которой зависит от интенсивности управляющего излучения $I(x, y)$ и задается следующим соотношением:

$$\varphi(x, y) = k_i I(x, y), \quad (1)$$

где k_i – коэффициент пропорциональности.

На светочувствительном элементе системы (ПЗС-матрице) происходит интерференция двух световых волн, одна из которых плоская, а вторая несет информацию о текущей фазовом профиле слоя ЖК модулятора, который в начальный момент времени (в первой итерации) также является плоским. Зарегистрированная ПЗС-матрицей картина интерференции воспроизводится без искажений на светочувствительном слое ОА ЖК ПМС, замыкая тем самым петлю обратной связи. Предполагается, что замыкание петли осуществляется строго линейным образом, т. е. ни камера, ни цифровой тракт передачи, ни устройство воспроизведения интерференционной картины не вносят искажений в распределение интенсивности вследствие собственной нелинейности, шумов или выхода за линейный участок собственных характеристик.

Результат этой интерференции можно записать в следующем виде:

$$I(x) = I_{rr}[1 + p \sin(kx + \varphi(x, y))], \quad (2)$$

где k – волновое число; I_{rr} и p – коэффициенты передачи.

Полученное распределение интенсивности определяет фазовый профиль модулятора на следующей итерации. Моделирование показало, что подобный итерационный процесс довольно быстро (за 3–4 такта перезаписи) сходится к существенно асимметричному профилю, и

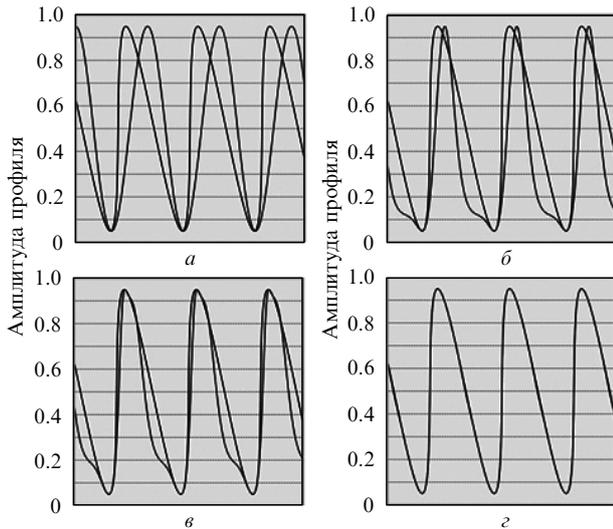


Рис.1. Результаты численного моделирования процесса установления пилообразного профиля фазовой модуляции. Профиль корректора на различных стадиях процесса формирования дан в сравнении с предельным. Номера итераций: 1 (а), 2 (б), 4 (в) и 30 (г). На рис.1,а–в приведен также профиль, показанный на рис.1,г.

этот профиль близок к искомому пилообразному (рис.1). При этом, как видно из рисунка, положение минимумов пилообразного профиля совпадает с положением минимумов исходной интерференционной структуры. Это означает, что поперечная структура голограммы, т.е. локальный период и направление полос, остается неизменной, а значит, ее можно применять, например, для коррекции искажений.

Был также проведен расчет дифракционной эффективности дифракционной фазовой решетки с профилем, представленным на рис.1,г. Расчет осуществлялся с помощью численного интегрирования по формуле Гельмгольца – Кирхгофа, где интенсивность в точке Р вычисляется как результат интерференции вторичных сферических волн:

$$I(P) = \frac{i}{2\lambda} \iint u(x, y) \frac{\exp(-ikr)}{r} (1 + \cos \theta) dS, \quad (3)$$

где λ – длина волны; $u(x, y)$ – интенсивность на поверхности модулятора; r – расстояние до точки, в которой вычисляется интенсивность; θ – направление распространения волны; dS – элемент поверхности источника вторичных волн (волнового фронта излучения).

Интенсивность на поверхности модулятора можно считать постоянной, но нужно учесть фазовый сдвиг. Интеграл можно свести к одномерному в случае наличия симметрии фазового профиля. Метод расчета основан на интегрировании вторичных волн с поверхности модулятора для каждого направления с учетом различного фазового набега:

$$D(\varphi) \sim \int_0^{2\pi} \left[\int_{-L}^L \sin(t + kr + I(l)dl) \right]^2 dt. \quad (4)$$

Здесь $D(\varphi)$ – относительная интенсивность сигнала, продифрагировавшего в направлении угла φ ; внутренний интеграл описывает интерференцию всех вторичных волн, излученных в одном направлении; t – начальная фаза дифрагирующей волны; l – расстояние до плоско-

сти, перпендикулярной направлению распространения искомого порядка дифракции (которое можно оценить как $l \sin \phi$); $I(l)$ – фазовый профиль модулятора. Внешний интеграл суммирует квадраты амплитуды итоговой волны для каждой начальной фазы от 0 до 2π , что, собственно, и соответствует интенсивности волны.

Число периодов фазовой решетки полагалось равным 20 (интеграл нельзя свести к одному периоду), число точек интегрирования – 1300. Результаты численного интегрирования в модельных расчетах, выполненных с помощью разработанной программы для фазовых профилей, для которых известно точное аналитическое решение (синусоида, П-образный меандр, идеальное пилообразное распределение) показали, что точность таких оценок весьма высока и расхождение теории и численного расчета не превышает 0.3%. Рассчитанная таким образом эффективность дифракции в –1-й порядок для кривой вида представленной на рис.1,г оказалась равной 67% при глубине фазовой модуляции 2π (от минимальной до максимальной величины) и 85% при оптимальной для данного профиля глубине фазовой модуляции 1.6 λ .

Изложенные выше соображения были проверены в модельном эксперименте. Схема экспериментальной установки показана на рис.2. Излучение He–Ne-лазера 1 ($\lambda = 633$ нм) расширялось коллиматором 2 и направлялось в интерферометр Майкельсона, образованный 50%-ным светоделителем 3, плоским зеркалом 4 и внутренним зеркалом ОА ЖК ПМС 10. Параметры такого модулятора (подробнее см. [11]) обеспечивают оптиически управляемую модуляцию оптической толщины слоя ЖК в пределах 3λ (1.5λ) на длине волны He–Ne-лазера с разрешением не менее $15–20 \text{ мм}^{-1}$.

Световые пучки, отраженные зеркалом 4 и внутренним зеркалом модулятора 10, сводились под небольшим углом и интерферировали на ПЗС-матрице (апертура 8 мм) камеры 6. При этом с помощью линзы 5 на матрице 6 строилось изображение плоскостей зеркал 3 и 10. Период интерференционной картины менялся в разных сериях экспериментов от 0.5 до 2 мм, т.е. на апертуре ПЗС-матрицы умещалось 4–16 периодов интерференционной картины.

Сигнал с ПЗС камеры в реальном режиме времени поступал на вход персонального компьютера 7 и с него – на мультимедийный проектор 8. В качестве последнего использовался коммерчески доступный мультимедий-

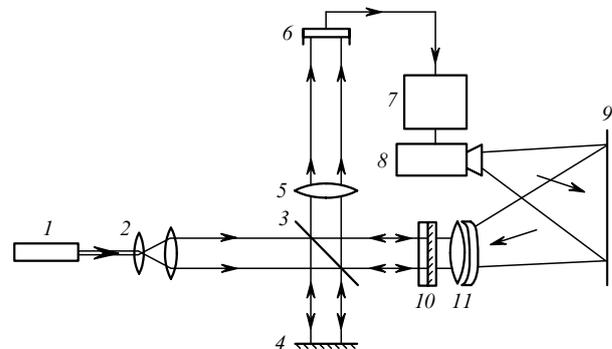


Рис.2. Схема экспериментальной установки (ход лучей показан стрелками):

1 – He–Ne-лазер; 2 – коллиматор; 3 – светоделитель; 4 – зеркало; 5 – линза; 6 – ПЗС-камера; 7 – персональный компьютер; 8 – мультимедийный проектор; 9 – рассеивающий экран; 10 – ОА ЖК ПМС с внутренним зеркалом; 11 – согласующий объектив.

ный проектор Canon LV-S1. Воспроизводимое компьютером изображение интерференционной картины строилось указанным проектором на рассеивающем белом экране 9. Это изображение в свою очередь проецировалось высококачественным репродукционным объективом 11 в плоскость ПМС.

Как уже было сказано выше, для реализации аналоговой процедуры асимметризации необходимо с высокой точностью обеспечить совпадение в масштабе 1:1 изображения интерференционной картины и породившей ее фазовой модуляции в слое ЖК ПМС. Такое совмещение в нашем эксперименте, аналогично предшествовавшему эксперименту [9], осуществлялось с помощью внутренних электронных регуляторов мультимедийного проектора, которые позволяли подбирать масштаб и положение изображения интерференционной картины на фоточувствительном слое ПМС, а также корректировать проективные искажения изображения.

Эксперимент показал, что в такой системе после 4–5 итераций, т. е. после смены 4–5 кадров с момента включения питания модулятора, картина интерференции двух пучков приобретала отчетливую асимметрию. Примеры сечений интерференционных картин при разной пространственной частоте приведены на рис.3.

Видно, что указанные дифракционные решетки несвободны от пространственного шума. Основным его источником является спекл-шум, а также паразитная интерференция в многочисленных слоях ПМС. Свой вклад в шум в случае компьютерной голографии дает и матричная (пиксельная) природа ПЗС-камеры. Однако из рис.3 видно, что глубина шумовой составляющей примерно на порядок меньше глубины решетки. С учетом того, что оптимальная глубина фазовой модуляции для асимметричной решетки составляет примерно одну длину волны излучения, интенсивность рассеяния на подобной шумовой

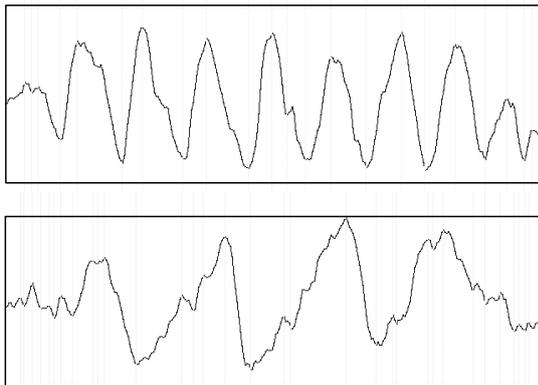


Рис.3. Сечения интерференционных картин после установления асимметричного профиля, полученные в эксперименте при различных пространственных частотах интерференционной картины.

решетке не может превышать нескольких процентов. При необходимости этот шум также может быть отфильтрован с помощью пространственного фильтра (диафрагмы в фокальной области объектива, строящего изображение интерферограммы), но в данном модельном эксперименте фильтрация не проводилась.

Согласно расчету, выполненному по формулам (3) и (4), эффективность дифракции в 1-й порядок на подобных структурах составила от 65 % до 75 % для различных реализаций, причем оптимальная глубина фазовой модуляции менялась от 1.6π до 2π . Это близко к значениям дифракционной эффективности динамических голограмм с асимметричным профилем штриха, записываемых цифровым способом [4, 5].

Таким образом, в результате проделанной работы – численно и экспериментально промоделирована схема записи голографического корректора в петле оптической обратной связи, в которой замыкание контура осуществляется телевизионно-компьютерным методом;

– показано, что применение такого переноса информации позволяет существенно упростить оптическую схему, а покадровая перезапись интерференционной картины исключает влияние гистерезисных явлений;

– исследована динамика установления асимметричного профиля голографической решетки и выявлено, что дифракционная эффективность в рабочий 1-й порядок достигает 70 % – 75 %.

– полученные результаты открывают путь к созданию эффективных тонких динамических голографических решеток, важных для задач голографической коррекции искажений, создания дифракционных ответвителей и т. п.

Авторы признательны В.А.Беренбергу за плодотворные обсуждения, а также студентам А.В.Сергееву и И.А.Руденко, участвовавшим в проведении экспериментов.

1. Васильев М.В., Венедиктов В.Ю., Лещёв А.А. *Квантовая электроника*, **31**, 1 (2001).
2. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. *Пространственные модуляторы света* (М.: Радио и связь, 1987).
3. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. *Оптика дифракционных элементов и систем* (Л.: Машиностроение, 1986).
4. Toyoda H., Kobayashi Y., Yoshida N., et al. *Techn. Digest OSA Snowmass Meeting (SLM'99)* (Snowmass, Colorado, 1999, SMB3).
5. Percheron I., Baker J.T., Gruneisen M., et al. *Proc. 2nd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*. Ed. by Gordon D.Love (Singapore–New Jersey–London–Hong Kong: World Scientific, 1999, p. 384).
6. Беренберг В.А., Венедиктов В.Ю. *Оптич. журн.*, **68**, 34 (2001).
7. Fisher A.D., Warde C. *Opt. Lett.*, **87**, 353 (1983).
8. Dou R., Vorontsov M.A., Sivokon V.P., Giles M.K. *Opt. Eng.*, **36**, 3327 (1997).
9. Лещев А.А., Беренберг В.А., Васильев М.В., Венедиктов В.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 716 (2007).
10. Ласкин В.А. *Сб. трудов молодежной научной конф. «Физика и Прогресс»* (СПб: изд-е СПбГУ, 2007, с. 168).
11. Berenberg V.A., Ivanova N.L., Isaev M.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 711 (2005).