

## Осевой диффузный направленный экран на основе пропускающей голограммы Габора

© Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: nina@holo.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 27 мая 2004 г.)

Теоретически и экспериментально рассмотрены особенности голографических однокомпонентных диффузных экранов, выполненных на основе осевых пропускающих голограмм. Проведен анализ конфигурации восстановленных голограммой дополнительных изображений диффузного экрана (сопряженное изображение, гало, нулевой порядок). Предложена так называемая центрированная голограмма, у которой сопряженное изображение диффузного экрана пространственно совпадает с основным изображением и таким образом исключаются вносимые сопряженным изображением искажения. Предложена также и осуществлена экспериментально схема записи голограмм на основе интерферометра Маха—Цендера, позволившая исключить появление тени объекта на голограмме. Отмечено, что в случае записи плоского диффузного экрана наличие гало не ведет к искажениям изображения объекта, проецируемого через экран, а только приводит к частичной потере света. Исследования проецируемых изображений показали, что, хотя яркость нулевого порядка относительно невелика, ее следует понизить тем или иным способом.

### Введение

Осевая голограмма, предложенная Д. Габором в 1948 г., исторически явилась первым известным типом голограмм [1,2]. По существу осевая голограмма является одной из разновидностей тонких голограмм, которые, как известно, кроме основного изображения объекта восстанавливают также и дополнительные. В отличие от внеосевой голограммы [3], где все эти изображения пространственно разделены, в случае осевой голограммы дополнительные изображения накладываются на основные изображения, что ведет к его существенным искажениям. Вместе с тем осевая голограмма имеет некоторые существенные преимущества. В частности, она хорошо сопрягается с оптическими системами, большинство из которых осесимметричны. В рассматриваемом случае, когда голограмма используется для проекции изображения через экран, осевая схема проекции позволяет избежать искажений проецируемого изображения, обусловленных наклоном проецирующих лучей по отношению к экрану. Использование осевой голограммы является одним из немногих путей создания осевого голографического экрана.

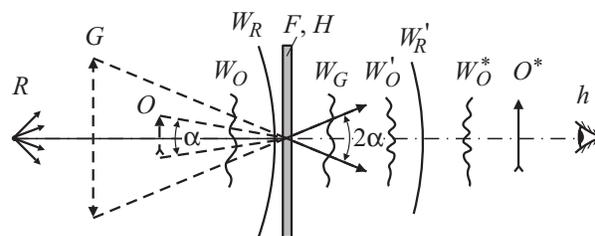
### Схема записи и реконструкции осевой голограммы

Общая схема записи и реконструкции осевой голограммы приведена на рис. 1. Излучение точечного референтного источника  $R$  освещает объект  $O$ , который рассеивает это излучение, формируя объективную волну  $W_O$ . Референтная волна  $W_R$  формируется излучением источника  $R$ , попадающим на фотопластинку, минуя объект. Проявленная фотопластинка  $F$ , на кото-

рой зарегистрирована картина интерференции, является голограммой  $H$ .

На этапе реконструкции на голограмму  $H$  направляется волна  $W_R$  референтного источника  $R$ . Взаимодействуя с этой волной, голограмма формирует четыре волны  $W'_O$ ,  $W'_R$ ,  $W_O^*$ ,  $W_G$ . Волна  $W'_O$  представляет собою продолжение волны  $W_O$ , рассеянной объектом  $O$ . Воспринимая эту волну, наблюдатель видит объемное изображение объекта  $O$ . Волна  $W'_R$  является продолжением волны  $W_R$ , испущенной восстанавливающим источником  $R$ . Волна  $W_O^*$  образует так называемое сопряженное изображение объекта  $O^*$ . Д. Габор показал, что, для того чтобы определить положение сопряженного изображения, достаточно отразить объект  $O$  в референтной волне  $W_R$ , как в зеркале [2]. Волна  $W_G$  образует гало  $G$  рассеянного света.

Рис. 1 наглядно иллюстрирует основной недостаток осевой голограммы, заключающийся в том, что при



**Рис. 1.** Схема записи и реконструкции осевой голограммы:  $R$  — точечный референтный источник;  $O$  — объект;  $W_O$  — волна излучения, рассеянного объектом  $O$ ;  $W_R$  — волна референтного источника  $R$ ;  $F$  — фотопластинка, она же голограмма  $H$  после проявления фотопластинки  $F$ ;  $W'_O$  — восстановленная объектная волна;  $W'_R$  — восстановленная референтная волна;  $W_O^*$  — волна, сопряженная по отношению к объектной волне  $W_O$ ;  $O^*$  — сопряженное изображение объекта  $O$ ;  $h$  — положение глаза наблюдателя.

наблюдении восстановленного изображения объекта  $O$  из точки  $h$  это изображение существенно искажается, так как на него накладывается точечное изображение источника  $R$ , сопряженное изображение объекта  $O^*$ , а также гало рассеянного света  $G$ .

## Теория тонкой амплитудной (в том числе осевой) голограммы [1]

Значения электрического поля объектной  $E_O$  и референтной  $E_R$  волн запишем в следующем виде:

$$E_O = A_O(r) \exp i\varphi_O(r), \quad (1)$$

$$E_R = A_R \exp i\varphi_R(r). \quad (2)$$

В соотношении (2) учтено, что амплитуда  $A_R$  референтной волны на зависит от координат. Суммарное электрическое поле  $E_S$ , действующее на фотопластинку, найдем, складывая  $E_O$  и  $E_R$ ,

$$E_S(r) = A_O(r) \exp i\varphi_O(r) + A_R(r) \exp i\varphi_R(r). \quad (3)$$

Распределение интенсивности  $J_S$ , соответствующее полю  $E_S$ , найдем, умножая на его сопряженное значение,

$$J_S(r) = E_S E_S^* = A_O^2(r) + A_O(r)A_R \exp i[\varphi_R(r) - \varphi_O(r)] + A_O(r)A_R \exp i[\varphi_O(r) - \varphi_R(r)] + A_R^2. \quad (4)$$

Предположим, что на этапе проявления экспонирования фотопластинка  $F$  подвергается такой химической обработке, что ее амплитудный коэффициент пропускания  $\tau_H$  пропорционален интенсивности действовавшего на фотопластинку излучения. При этом имеется в виду, что

$$\tau_H \sim \sqrt{T} \sim J_S, \quad (5)$$

где  $T$  — коэффициент пропускания по интенсивности.

Соотношение (5) предполагает, что процесс проявления является позитивным, т.е. наиболее экспонированным областям фотопластинки  $F$  соответствуют наиболее прозрачные части проявленной голограммы.

Подставляя в соотношение (4) значение  $J_S$  из (5), найдем распределение амплитудного коэффициента пропускания  $\tau_H(r)$  по поверхности голограммы

$$\tau_H(r) = A_O^2(r) + A_O(r)A_R \exp i[\varphi_R(r) - \varphi_O(r)] + A_O(r)A_R \exp i[\varphi_O(r) - \varphi_R(r)] + A_R^2. \quad (6)$$

Перейдем к процессу реконструкции. Предположим, что голограмма освещается волной  $E_R$ , испущенной референтным источником  $R$  (см. выражение (2)). Значение электрического поля  $E_H$  найдем, умножая  $\tau_H$  (см. выражение (6)) на  $E_R$ ,

$$E_H(r) = A_O^2(r)A_R \exp i\varphi_R(r) + A_O(r)A_R^2 \exp i[2\varphi_R(r) - \varphi_O(r)] + A_O(r)A_R^2 \exp i\varphi_O(r) + A_R^3 \exp i\varphi_R. \quad (7)$$

Учитывая, что амплитуда  $A_R$  референтной волны является постоянной величиной, нетрудно определить, что третье слагаемое выражения (7) описывает восстановленную голограммой волну  $E_O$  (см. выражение (1)), которая формирует восстановленное изображение объекта  $O$  (рис. 1).

Четвертое слагаемое выражения (7) описывает волну, идентичную референтной волне  $E_R$  (см. выражение (2)). Эта волна формирует изображение точечного источника  $R$  (рис. 1).

Третьему слагаемому выражения (7) соответствует сопряженное изображение объекта  $O^*$ , локализацию которого, как это отмечалось ранее, можно определить, отражая объект  $O$  в референтной волне  $W_R$ , как в зеркале. Знак „минус“ перед фазой  $\varphi$  этого слагаемого означает, что сопряженное изображение  $O^*$  псевдоскопично.

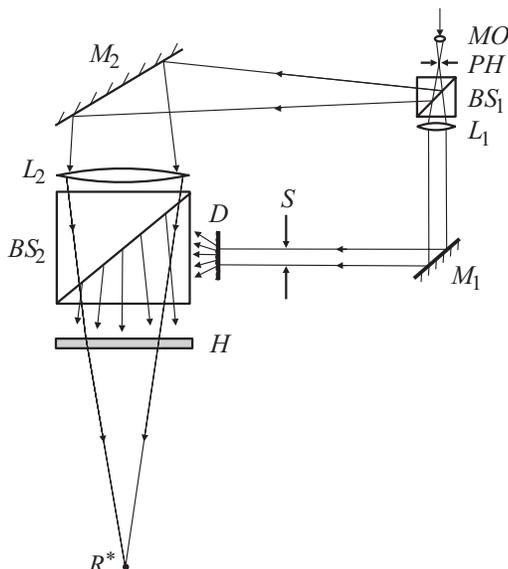
Первое слагаемое выражения (7) описывает гало  $G$  излучения референтного источника, которое было рассеяно на структуре, образовавшейся в результате интерференции света, испущенного различными точками объекта  $O$  при записи голограммы. При этом в случае, когда угловой размер объекта равен  $\alpha$ , излучение, образующее гало  $G$ , распространяется в пределах угла  $\alpha$  (рис. 1).

## Эксперимент по записи экрана на основе осевой голограммы

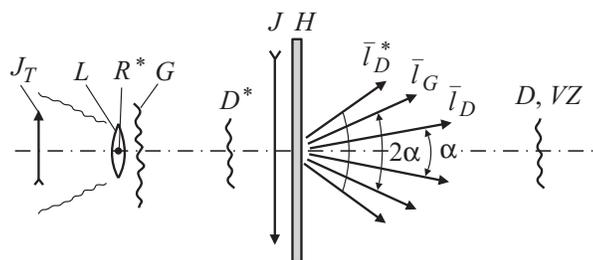
На рис. 2 приведена схема записи осевого голографического экрана на основе осевой пропускающей голограммы. В отличие от исходной схемы Д. Габора референтная волна не встречает на своем пути объект. Таким образом, исключается появление тени объекта на голограмме. В основе схемы лежит интерферометр Маха—Цендера, который служит для организации двух независимых пучков — объектного и референтного, которые падают на голограмму соосно.

Луч лазера, проходя через микрообъектив  $MO$  и пинхол  $PH$ , фокусировался в точку. Расходящаяся из точки волна расщеплялась светоделительным элементом  $BS_1$  на объектную и референтную ветви. Стоящая в объектной ветви линза  $L_1$  формировала плоскую волну, которая с помощью зеркала  $M_1$  направлялась на диффузор  $D$ , в качестве которого использовалось матовое стекло. Рассеянное диффузором излучение посылалось с помощью светоделительного элемента  $BS_2$  на фотопластинку, на которой записывалась голограмма  $H$ .

Сферическая волна в референтной ветви зеркалом  $M_2$  посылалась на линзу  $L_2$  и после прохождения светоделительного элемента  $BS_2$  и фотопластинку  $H$  сходилась в точку  $R^*$ . В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер ( $\lambda = 628 \text{ nm}$ ) мощностью 30 мВт. Голограммы записывались на отечественных высоко разрешающих фотопластинках ПФГ-03М производства завода „Славич“. Экспонированные фотопластинки проявлялись в проявителе ГП-3, рекомендованном заводом для данного типа эмульсий.



**Рис. 2.** Схема записи осевого голографического экрана на основе осевой пропускающей голограммы:  $MO$  — микрообъектив;  $PH$  — пинхол;  $BS_1$  и  $BS_2$  — светоделительные элементы;  $L_1$  и  $L_2$  — линзы;  $M_1$  и  $M_2$  — зеркала;  $D$  — диффузор (матовое стекло);  $H$  — голограмма;  $S$  — диафрагма,  $R^*$  — точка, в которую фокусируется референтная волна.



**Рис. 3.** Схема проекции изображений с помощью осевой голограммы-экрана:  $l_G$ ,  $l_D$ ,  $l_D^*$  — лучи, формирующие изображение гало  $G$ , диффузора  $D$  и сопряженное изображение диффузора  $D^*$ ;  $VZ$  — зона видения;  $R^*$  — точка, в которую сходится референтная сферическая волна при записи голограммы;  $J$  — проецируемое на экран  $H$  с помощью помещенной в точку  $R^*$  линзы  $L$  изображение транспаранта  $J_T$ .

Схема проекции изображения с помощью записанной указанным способом осевой голограммы-экрана представлена на рис. 3. В этом случае центр линзы  $L$ , проецирующей изображение  $I$  на экран  $H$ , помещен в точку  $R^*$ , в которую сходилась сферическая референтная волна при записи голограммы. В соответствии со схемой записи, представленной на рис. 2, освещенная таким образом голограмма восстановит изображение диффузора  $D$ , играющего роль зоны видения  $VZ$ , через которую видно изображение  $I$ , спроецированное на экран. Кроме изображения диффузора  $D$  голограмма  $H$  восстанавливает мнимое сопряженное изображение экрана  $D^*$ , а также мнимое изображение гало  $G$ .

При записи осевой голограммы не были предприняты какие-либо меры для подавления гало, сопряженного изображения, а также нулевого порядка. Несмотря на это, изображение, проецируемое на голограмму-экран, фактически не подверглось искажениям, за исключением появления в центре экрана изображения точечного источника, восстанавливающего голограмму. Это изображение несколько размыто в связи с тем, что точечный источник  $R^*$  находится на достаточно большом расстоянии от экрана  $H$ , в то время как система, регистрирующая изображение на экран, была сфокусирована на плоскость экрана.

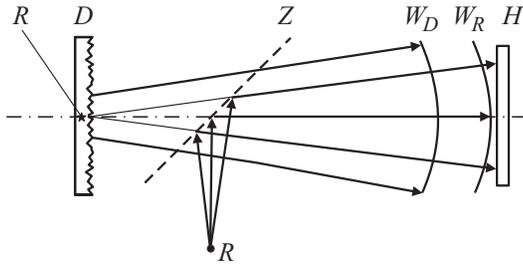
Восстановленные осевой голограммой лучи  $I_D^*$ ,  $I_G$ , формирующие сопряженное изображение диффузора  $D^*$  и изображение гало  $G$ , фактически эквивалентны лучам, формирующим изображение диффузора  $D$ , и не вносят каких-либо искажений в изображение, проецируемое на экран  $H$ . К отрицательной роли лучей гало  $G$  и сопряженного изображения  $D^*$  следует отнести то, что значительная часть этих лучей проходит мимо зоны видения  $VZ$ , уменьшая энергетическую эффективность проектора.

Вместе с тем эти составляющие образуют рассеянный свет, проходящий мимо зрительной зоны, и таким образом снижают энергетическую эффективность проектора. Нулевой порядок попадает в поле зрения наблюдателя в виде яркой точки и должен быть подавлен тем или иным методом.

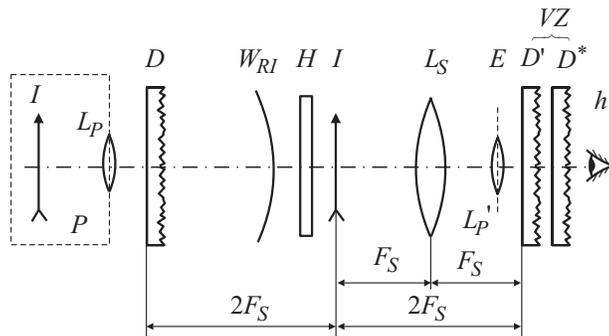
### Осевой голографический экран на основе тонкой центрированной голограммы

Появление яркого изображения точки нулевого порядка в поле зрения наблюдателя, воспринимающего изображение сцены, спроецированное на экран, не является единственным существенным недостатком тонкой голограммы. Не менее важно, что при наблюдении сквозь зону видения  $VZ$  сопряженное изображение диффузора  $D^*$  играет роль некоторого окна, через которое изображение сцены  $I$  кажется более ярким, что приводит к неравномерности освещения поля зрения. К сожалению, это сопряженное изображение в отличие от нулевого порядка и гало не может быть исключено за счет фазовой модуляции структуры осевой голограммы.

Единственным способом исключения влияния сопряженного изображения является перемещение его положения таким образом, чтобы оно не влияло на распределение интенсивности в поле зрения наблюдателя  $h$  (рис. 1). Положение сопряженного изображения можно определить с помощью правила Д. Габора, которое следует из второго слагаемого уравнения (7). Анализируя с помощью этого правила возможные положения сопряженного изображения диффузора  $D^*$ , нетрудно прийти к заключению, что сопряженное изображение  $D^*$  совпадает с положением основного изображения  $D$  только в случае, когда при записи голограммы референтный



**Рис. 4.** Схема записи центрированной осевой голограммы.  $D$  — объект (диффузор);  $R$  — референтный источник, изображение которого введено в центр диффузора полупрозрачным зеркалом  $Z$ ;  $W_D$  и  $W_R$  — объективная и референтная волны, картина интерференции которых записывается в виде голограммы  $H$ .



**Рис. 5.** Схема проекции изображения  $I$  с помощью проектора на основе центрированной голограммы:  $L_P$  — линза проектора  $P$ , проецирующая изображение  $I$  на голограмму диффузора  $H$ ;  $D'$  — восстановленное изображение диффузора, возникающее при восстановлении голограммы;  $D^*$  — сопряженное изображение диффузора;  $W_{RI}$  — восстанавливающая волна, интенсивность которой модулирована изображением;  $H$  — голограмма диффузора (экран);  $I$  — изображение, спроецированное на экран  $H$ ;  $L_S$  — линза, проецирующая восстановленное изображение наблюдателю  $h$ ;  $L'_P$  — изображение линзы проектора;  $E$  — гало;  $VZ$  — зона видения, через которую наблюдатель смотрит на изображение  $I$ , которое кажется расположенным на бесконечности, так как изображение  $I$  удалено от линзы  $L_S$  на фокусное расстояние этой линзы  $F_S$ .

источник  $R$  располагается в центре регистрируемого диффузора  $D$  (рис. 4). При записи такой голограммы волна  $W_D$  излучения, рассеянного диффузором  $D$ , смешивается со сферической референтной волной  $W_R$ , испущенной источником  $R$ , который перенесен в центр объекта полупрозрачным зеркалом  $Z$ . Результат интерференции волн  $W_D$  и  $W_R$  записывается на голограмме  $H$ . Из рисунка следует, что при реконструкции такой голограммы сопряженное изображение объекта  $D^*$  должно совпадать с объектом  $D$ , поскольку объект  $D$  находится в центре сферической волны  $W_R$ , которая при построении сопряженного изображения  $D^*$  принимается за зеркало, в котором следует изобразить объект  $D$ . Рассмотренную выше голограмму, отличающуюся тем, что референтный

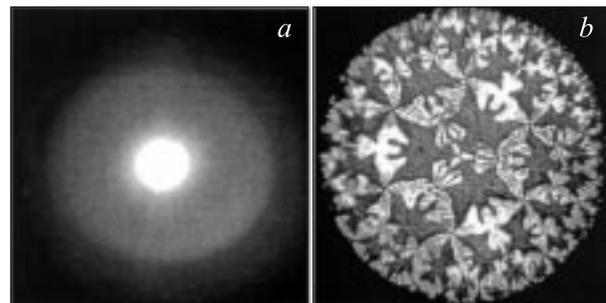
источник располагается в центре регистрируемого объекта, мы назвали центрированной голограммой.

Схема проекции изображения через голографический экран, выполненный на основе осевой центрированной голограммы, приведена на рис. 5. Линза  $L_P$  проектора  $P$  проецирует изображение сцены  $I$  на голографический экран  $H$ , основанный на использовании центрированной голограммы. Проекция осуществляется посредством сферической волны  $W_{RI}$ , интенсивность которой модулирована проецируемым изображением. Экран  $H$  восстанавливает изображение диффузора  $D'$ , а также совпадающее с ним сопряженное изображение этого диффузора  $D^*$ . Кроме того, если нулевой порядок не подавлен, экран формирует изображение линзы проектора  $L'_P$ . Наблюдатель  $h$  рассматривает изображение на экране  $H$  через изображения  $D'$  и  $D^*$  диффузора  $D$ , сформированные голограммой-экраном  $H$ .

Так как какие-либо сведения о центрированных осевых голограммах в литературе отсутствовали, нами был проведен предварительный эксперимент по исследованию возможности записи изображений с помощью такого метода. Схема эксперимента совпадала со схемами записи центрированной голограммы (рис. 4) и проекции изображения через экран  $H$ , выполненный на ее основе (рис. 5). Запись голограммы осуществлялась с помощью He-Ne лазера на голографических фотопластинках ПФГ-03М (в данном случае можно было использовать пластинки с существенно меньшим разрешением).

В процессе экспериментов центрированная голограмма записывалась и восстанавливалась по рассмотренной выше схеме. Распределение интенсивности в зоне видения  $VZ$  приведено на рис. 6, *a*. На рисунке видна круглая зона, заполненная светом, восстановленным голографическим диффузором  $H$ . В центре этой зоны наблюдается нулевой порядок. Сопряженное изображение диффузора или какие-либо другие посторонние изображения отсутствуют, как это и следует из принципа действия голограммы этого типа.

На рис. 6, *b* приведено изображение, спроецированное на поверхность экрана  $H$  и наблюдаемое через зону видения  $VZ$ . Как это видно из рис. 6, *b*, неоднородности освещенности зоны видения практически не ведут к ухудшению однородности освещенности проецируемого изображения.



**Рис. 6.** Картина зоны видения и картина, спроецированная на экран: *a* — распределение света в зоне видения  $VZ$ , *b* — изображение  $I$ , локализованное на экране  $H$ .

Таким образом, взяв за основу тонкую осевую голограмму Габора, мы последовательно разработали новый вид голограмм, которые позволяют частично компенсировать отдельные искажения проецируемого изображения, характерные для этой простейшей осевой голограммы. В частности, был предложен и исследован осевой голографический экран на основе центрированной голограммы, который позволяет устранить искажения изображения, вносимые сопряженным изображением, сопровождающим реконструкцию тонких голограмм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-17593) и гранта президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ (грант № НШ-98.2003.2).

## Список литературы

- [1] *Gabor D.* // Proc. Roy. Soc. (London). 1949. Vol. A197. P. 454.
- [2] *Gabor D.* // Proc. Phys. Soc. 1951. Vol. B64. P. 449.
- [3] *Leith E.N., Upatnieks J.* // J. Opt. Soc. Am. 1962. Vol. 52. P. 1123.