

## Многоэкспозиционная голографическая интерферометрия при изучении динамики объектов с повышенной чувствительностью измерений

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
230023 Гродно, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 23 июля 2001 г. В окончательной редакции 29 ноября 2001 г.)

Предложена методика повышения чувствительности измерений с компенсацией aberrаций при восстановлении интерферограмм с двух многоэкспозиционных голограмм. На первом этапе реализации методики изучения изменений исследуемого объекта голографические структуры, зарегистрированные в интересующие нас моменты времени, перезаписываются двумя когерентными пучками на новые носители. При этом используется интерференционно-муаровый способ контроля равенства векторов перезаписанных голографических структур. На последнем этапе новые голограммы уже нелинейного вида обрабатываются в оптическом анализаторе сопряженных голограмм с использованием некогерентного света. Восстановленная таким образом интерферограмма имеет повышенную чувствительность измерений и свободна от aberrаций. Приведены результаты экспериментальной апробации методики при визуализации изменений температурных полей в стеклянной подложке, покрытой токопроводящей пленкой.

### Введение

Голографическая интерферометрия в отличие от классической обладает рядом существенных преимуществ, таких как компенсация aberrаций оптических элементов интерферометра, возможность произвольной настройки полос интерференционной картины, а также регулирование чувствительности измерений на стадии оптической обработки голограммы [1–3]. Повышение чувствительности измерений в голографической интерферометрии достигается за счет использования нелинейных свойств голограммы и восстановления высших порядков дифракции [4,5], а также за счет перезаписи голограмм [6,7]. Сочетание перезаписи с нелинейной регистрацией вторичных голограмм позволяет достичь значительных коэффициентов повышения чувствительности измерений при увеличении степени компенсации aberrаций как системы регистрации, так и оптической обработки голограмм [8–10].

При исследовании быстропротекающих процессов преимущества голографических методов для решения данной задачи еще более очевидны. При этом различные состояния исследуемого объекта могут быть зарегистрированы как на отдельные носители [11], так и на один, но с использованием перемещения опорного пучка [12,13]. В последнем случае несколько различных состояний исследуемого объекта регистрируются на один общий носитель, что позволяет сократить затраты на проведение экспериментальных исследований. Количество экспозиций различных состояний зарегистрированных на одном носителе, естественно, ограничено. При регистрации большого количества голографических структур, соответствующих различным состояниям исследуемого объекта, приходится по этой причине ис-

пользовать уже несколько носителей. В этом случае при оптической обработке нескольких многоэкспозиционных голограмм возникают затруднения в сравнении различных состояний исследуемого объекта, зарегистрированных на различных носителях. Например, если установить пару таких многоэкспозиционных голограмм в двухканальном интерферометрическом корреляторе [14] и выделить фильтрующей диафрагмой волны, дифрагированные на голографических структурах, сравниваемых состояний исследуемого объекта, то результирующая интерференционная картина, визуализирующая различие состояний, будет дополнительно искажена неоднородностями подложек носителей многоэкспозиционных голограмм. Кроме этого, следует отметить, что при регистрации нескольких голографических структур на один общий носитель значительно усложняется дифракционный спектр многоэкспозиционной голограммы, наблюдаемый в задней фокальной плоскости объектива. При нелинейной регистрации такой голограммы дифракционный спектр уже настолько усложняется из-за появления дополнительных максимумов вследствие перекрестных искажений [15], что делает невозможным выделение волн, дифрагированных на соответствующих голографических структурах, без наложения на них волн перекрестной дифракции. Последние обстоятельства не позволяют использовать нелинейные свойства многоэкспозиционной голограммы для повышения чувствительности измерений.

В данной работе разработана методика оптической обработки многоэкспозиционных голограмм с повышенной чувствительностью измерений и с компенсацией aberrаций, позволяющая на конечном этапе использовать даже некогерентное освещение.

### Описание методики

Предположим, что на несколько носителей голографическим способом регистрируется в различные моменты времени по  $N$  состояний исследуемого объекта. Результирующее распределение интенсивности на одном из носителей можно представить как сумму интенсивностей каждой экспозиции при регистрации отдельной голографической структуры

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_N. \quad (1)$$

Если регистрация многоэкспозиционной голограммы производится в линейных условиях, то ее амплитудное пропускание прямо пропорционально результирующей интенсивности [3]. Предположим, что зарегистрировано таким образом две многоэкспозиционных голограммы с амплитудными пропусканиями  $\tau$  и  $\tau'$ :

$$\tau = \tau_0 + \sum_{l=1}^N \cos[2\pi(\xi_l x + \eta_l y) + \varepsilon_l + \varphi], \quad (2)$$

$$\tau' = \tau'_0 + \sum_{l=1}^N \cos[2\pi(\xi_l x + \eta_l y) + \varepsilon'_l + \varphi], \quad (3)$$

где  $\tau_0$  и  $\tau'_0$  — постоянные составляющие, пространственные частоты  $l$ -й голографической структуры  $\xi_l = \cos \gamma_{lx}/T_l$  и  $\eta_l = \cos \gamma_{ly}/T_l$ ,  $\gamma_{lx}$  и  $\gamma_{ly}$  — углы между полосами структуры и осями  $ox$  и  $oy$  соответственно,  $T_l$  — период полос  $l$ -й голографической структуры,  $\varepsilon_l$  и  $\varepsilon'_l$  — изменения фазы, вызванные исследуемым объектом в моменты  $l$ -х экспозиций при экспонировании первой и второй голограмм,  $\varphi$  — искажения фазы, вызванные аберрациями оптической системы регистрации (голографического интерферометра). Система координат  $xoy$  совмещена с плоскостью голограммы. Пространственные частоты  $\xi_l$  и  $\eta_l$  прямо пропорциональны проекции вектора  $l$ -й голографической структуры. Последний лежит в плоскости голограммы и перпендикулярен полосам структуры. Следует указать на необходимость изменения при регистрации многоэкспозиционной голограммы ориентации или величины периода голографических полос для каждой экспозиции. Это является обязательным условием исключения наложения дифракционных порядков восстановленных волн при оптической обработке многоэкспозиционной голограммы и достигается, например, изменением угла между направлениями распространения объектного и опорного пучков перед каждой экспозицией [15].

В ряде работ [16–19] было показано, что при повышении чувствительности измерений для получения высококачественных интерферограмм с низкими шумами необходимо использовать некогерентное освещение. Реализация методики проходит в два этапа. На первом этапе предполагается перезаписывать с многоэкспозиционных голограмм голографические структуры, соответствующие интересующим нас экспозициям,

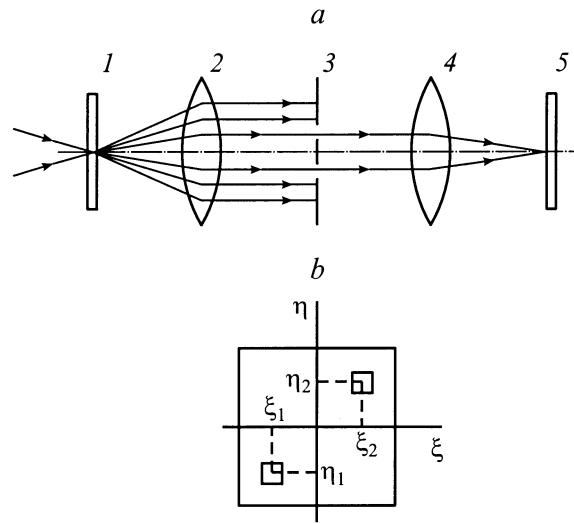


Рис. 1. Оптическая схема устройства перезаписи многоэкспозиционных голограмм (а) и вид фильтра пространственных частот (б).

в комплексно сопряженных порядках на два новых носителя. Перезапись также предусматривает точный контроль равенства векторов перезаписанных голографических структур. Зарегистрированная в нелинейных условиях такая пара голограмм на последнем этапе обрабатывается в оптическом анализаторе сопряженных голограмм при использовании некогерентного источника света [3].

Перезапись многоэкспозиционных голограмм осуществляется двумя когерентными пучками в устройстве перезаписи (рис. 1, а). Такое устройство может быть создано на базе любого двухчленного интерферометра [17]. Для обеспечения приблизительного равенства векторов перезаписанных голографических структур в фильтре пространственных частот 3 (рис. 1, а), установленном в задней фокальной плоскости объектива 2, проделаны два отверстия с координатами в центрах  $(\xi_1, \eta_1)$  и  $(\xi_2, \eta_2)$  (рис. 1, б) относительно главной оптической оси. Такой пространственный фильтр будет пропускать волны, имеющие пространственные частоты, приблизительно равные  $\xi_1 = \cos \alpha_1/\lambda$ ,  $\eta_1 = \cos \beta_1/\lambda$  и  $\xi_2 = \cos \alpha_2/\lambda$ ,  $\eta_2 = \cos \beta_2/\lambda$ , где  $\cos \alpha_1$ ,  $\cos \beta_1$  и  $\cos \alpha_2$ ,  $\cos \beta_2$  — направляющие косинусы волн, определяющие направление их распространения,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — углы между направлениями распространения и осью  $ox$ , а  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — осью  $oy$ . Для перезаписи первой голографической структуры, например, соответствующей  $b$ -й экспозиции, используют две когерентные волны с пространственными частотами  $\xi_{01}$ ,  $\eta_{01}$  и  $\xi_{02}$ ,  $\eta_{02}$ , удовлетворяющими условиям:

$$\begin{aligned} \xi_{01} &= \xi_1 - \xi_b, & \eta_{01} &= \eta_1 - \eta_b, \\ \xi_{02} &= \xi_2 + \xi_b, & \eta_{02} &= \eta_2 + \eta_b, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\xi_b = \cos \gamma_{bx}/T_b$ ,  $\eta_b = \cos \gamma_{by}/T_b$ ,  $T_b$  — период полос  $b$ -й голографической структуры, ориентированной

под углами  $\gamma_{bx}$  и  $\gamma_{by}$  к осям  $ox$  и  $oy$  соответственно в плоскости многоэкспозиционной голограммы. В этом случае фильтром пространственных частот выделяются волны

$$\begin{aligned} A_1 &= a_b \exp\{i[2\pi(\xi_1 + \delta\xi_1)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_1 + \delta\eta_1)y + \varepsilon_b + \varphi + \psi_0]\}, \\ A_2 &= a_b \exp\{i[2\pi(\xi_2 + \delta\xi_2)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_2 + \delta\eta_2)y - \varepsilon_b - \varphi + \psi_0]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\delta\xi_1$ ,  $\delta\eta_1$  и  $\delta\xi_2$ ,  $\delta\eta_2$  — ошибки юстировки, возникающие вследствие неточности выполнения условия (4), а функция  $\psi_0$  описывает оптические неоднородности подложки носителя многоэкспозиционной голограммы (2). Ошибки юстировки связаны с конечными размерами отверстий в фильтре пространственных частот. Волны вида (5) в плоскости 5, оптически сопряженной с многоэкспозиционной голограммой 1 объективом 4, образуют перезаписанную голографическую структуру. Амплитудное пропускание перезаписанной  $b$ -й голографической структуры имеет вид

$$\begin{aligned} \tau_b &= \{1 + \cos[2\pi(\xi_1 - \xi_2 + \delta\xi)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_1 - \eta_2 + \delta\eta)y + 2(\varepsilon_b + \varphi)]\}^{-\gamma/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\delta\xi = \delta\xi_1 - \delta\xi_2$ ,  $\delta\eta = \delta\eta_1 - \delta\eta_2$ ,  $\gamma$  — коэффициент контрастности.

Проекция вектора перезаписанной голографической структуры на осях  $ox$  и  $oy$  определяются из (6) как

$$K_x = 2\pi(\xi_1 - \xi_2 + \delta\xi), \quad K_y = 2\pi(\eta_1 - \eta_2 + \delta\eta). \quad (7)$$

Перезаписанная голограмма может быть зарегистрирована в нелинейных условиях ( $\gamma \neq -2$ ), что обеспечит наличие высших порядков дифракции при ее восстановлении. Следует заметить, что неоднородности подложки исходной многоэкспозиционной голограммы (2) в перезаписанной (6) устранены.

Для перезаписи второй голографической структуры, соответствующей, например,  $c$ -й экспозиции, используют две когерентных волны с пространственными частотами  $\xi'_{01}$ ,  $\eta'_{01}$  и  $\xi'_{02}$ ,  $\eta'_{02}$ , удовлетворяющими условиям

$$\begin{aligned} \xi'_{01} &= \xi_1 - \xi_c, & \eta'_{01} &= \eta_1 - \eta_c, \\ \xi'_{02} &= \xi_2 + \xi_c, & \eta'_{02} &= \eta_2 + \eta_c, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\xi_c = \cos \gamma_{cx}/T_c$ ,  $\eta_c = \cos \gamma_{cy}/T_c$ ,  $T_c$  — период полос  $c$ -й голографической структуры, ориентированной под углами  $\gamma_{cx}$  и  $\gamma_{cy}$  к осям  $ox$  и  $oy$  соответственно в плоскости многоэкспозиционной голограммы.

Следует заметить, что  $c$ -я голографическая структура может быть расположена как на первой, так и на второй многоэкспозиционных голограммах. Наиболее сложный случай в отношении компенсации aberrаций является, когда исследуемые голографические структуры расположены на различных носителях. В этом случае

для перезаписи  $c$ -й голографической структуры вторая многоэкспозиционная голограмма устанавливается в положение 1 (рис. 1, а) и освещается двумя когерентными волнами с выполнением условия (8). В этом случае фильтром пространственных частот выделяются волны

$$\begin{aligned} A'_1 &= a_c \exp\{i[2\pi(\xi_1 + \delta\xi'_1)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_1 + \delta\eta'_1)y + \varepsilon'_b + \varphi + \psi'_0]\}, \\ A'_2 &= a_c \exp\{i[2\pi(\xi_2 + \delta\xi'_2)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_2 + \delta\eta'_2)y - \varepsilon'_c - \varphi + \psi'_0]\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\delta\xi'_1$ ,  $\delta\eta'_1$  и  $\delta\xi'_2$ ,  $\delta\eta'_2$  — ошибки юстировки, возникающие по тем же причинам, что и в первом случае, а функция  $\psi'_0$  описывает оптические неоднородности подложки носителя многоэкспозиционной голограммы (3).

Так как при перезаписи второй голографической структуры происходит замена многоэкспозиционных голограмм и юстировка оптической схемы с целью выполнения нового условия на пространственные частоты освещающих голограмму волн, то, очевидно, величины ошибок для случаев настройки при перезаписи первой и второй голографических структур различны. Но, вследствие того что вектор перезаписанной голографической структуры определяется не самой величиной ошибок, а их разностью, для выполнения условия равенства векторов перезаписанных голографических структур может быть использован принцип согласования интерференционного поля при перезаписи второй голографической структуры с уже перезаписанной первой голографической структурой [19]. Для этого после перезаписи первой голографической структуры на новый носитель последний устанавливается в прежнее положение 5 (рис. 1, а). Равенство векторов второй перезаписываемой интерференционной голографической структуры с первой уже перезаписанной голографической структурой полос контролируется по ширине полос муаровой картины. Последняя представляет низкочастотную модуляцию этих периодических структур, наблюдаемых как в прошедшем, так и в рассеянном свете на перезаписанной голографической структуре 5. С помощью дополнительной юстировки одного из освещающих вторую многоэкспозиционную голограмму 1 пучков добиваются настройки муаровой картины на бесконечно широкую полосу и, убрав носитель с перезаписанной первой голографической структурой, регистрируют на новом носителе, установленном в положение 5, вторую голографическую структуру. Достижение в муаровой картине бесконечно широкой полосы обеспечивает равенство разностей ошибок юстировки

$$\delta\xi_1 - \delta\xi_2 = \delta\xi'_1 - \delta\xi'_2, \quad \delta\eta_1 - \delta\eta_2 = \delta\eta'_1 - \delta\eta'_2. \quad (10)$$

Таким образом, амплитудное пропускание перезаписанной  $c$ -й голографической структуры будет иметь вид

$$\begin{aligned} \tau_c &= \{1 + \cos[2\pi(\xi_1 - \xi_2 + \delta\xi)x \\ &\quad + 2\pi(\eta_1 - \eta_2 + \delta\eta)y + 2(\varepsilon'_c + \varphi)]\}^{-\gamma/2} \end{aligned} \quad (11)$$

Вследствие выполнения равенств (10) проекции векторов решеток перезаписанных голографических структур в (6) и (11) равны, что обеспечивает равенство и самих векторов.

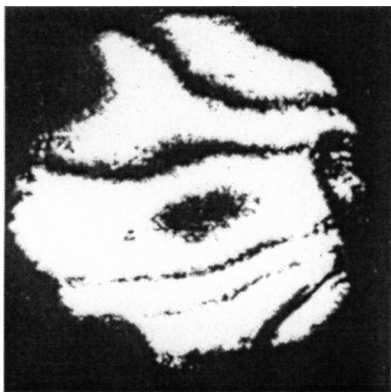
Полученная таким образом пара голограмм (6) и (11) может быть обработана в оптическом анализаторе сопряженных голограмм [3] с использованием некогерентного света. Например, при выделении  $\pm n$ -х порядков дифракции в плоскости регистрации будет наблюдаться интерференционная картина с настройкой на бесконечно широкую полосу, визуализирующая изменение объекта, прошедшее за время между  $b$ - и  $c$ -й экспозициями при регистрации исходных многоэкспозиционных голограмм

$$I_{cb} = 1 + \cos[4n(\varepsilon_b - \varepsilon_c)]. \quad (12)$$

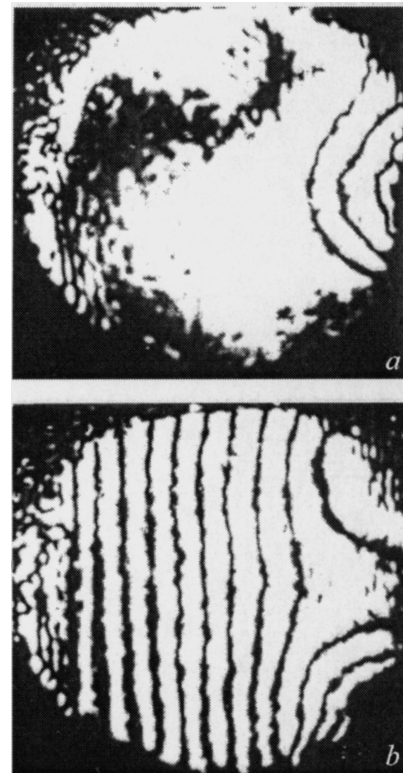
Чувствительность измерений такой интерферограммы повышена в  $4n$  раз, а aberrации системы регистрации и оптической обработки, а также неоднородности подложек носителей компенсированы полностью.

## Экспериментальные результаты

Вышерассмотренная методика повышения чувствительности измерений с компенсацией aberrаций была экспериментально апробирована при визуализации динамики нагрева стеклянной подложки, покрытой прозрачной токопроводящей пленкой вблизи контакта одного из электродов. К последним прикладывалось электрическое напряжение, изменяющееся во времени по определенному закону. Подложка с токопроводящей пленкой устанавливалась в объектную ветвь голографического интерферометра. В определенные моменты времени голографическим способом регистрировались состояния исследуемой подложки. В течение одного эксперимента регистрировалось пятнадцать состояний исследуемой подложки по пять голографических структур на три носителя при изменении ориентации самих штрихов структур. При восстановлении интерференционных картин, визуализирующих изменение температурного поля в исследуемой подложке, произошедшее за



**Рис. 2.** Интерферограмма, восстановленная с двух многоэкспозиционных голограмм в интерферометрическом корреляторе.



**Рис. 3.** Интерферограммы с настройкой на бесконечно широкую (a) и конечные (b) полосы, восстановленные с двух перезаписанных голограмм в оптическом анализаторе сопряженных голограмм.

время между любыми двумя экспозициями (по ранее известным методикам без повышения чувствительности измерений), искривление интерференционных полос было настолько незначительным, что не позволяло даже провести качественную оценку изменения температурного поля. При восстановлении интерференционных картин в интерферометрическом корреляторе с использованием двух различных многоэкспозиционных голограмм интерференционные полосы также сильно искажались неоднородностями подложек. На рис. 2 приведена такая интерферограмма с настройкой на бесконечно широкую полосу, восстановленная с голографических структур, зарегистрированных в интересующие нас моменты времени. Голографические структуры были расположены на различных многоэкспозиционных голограммах. Как видно из интерферограммы (электрод расположен справа), величина aberrаций значительно превышает величину полезного сигнала. Для компенсации неоднородностей подложек многоэкспозиционных голограмм и повышения чувствительности измерений голографические структуры, зарегистрированные в интересующие нас моменты времени, перезаписывались на новые носители по вышерассмотренной методике. Полученные таким образом новые голограммы имели достаточную нелинейность для использования высших порядков дифракции. На рис. 3 приведены интерферограммы, восстановленные в оптическом анализаторе

сопряженных голограмм с некогерентным источником света при использовании перезаписанных голограмм. Интерферограммы восстанавливались при выделении  $\pm 2$  порядков дифракции, что обеспечивало восьмикратное повышение чувствительности. При точном совмещении перезаписанных голограмм в оптическом анализаторе сопряженных голограмм восстанавливалась интерферограмма с настройкой на бесконечную широкую полосу (рис. 3, *a*). Следует отметить, что такая настройка интерференционной картины с полной компенсацией aberrаций возможна только при равенстве векторов голографических структур. Настройка на конечные полосы (рис. 3, *b*) достигалась незначительным разворотом одной голограммы относительно другой вокруг оптической оси устройства. Однако следует отметить, что при таком восстановлении интерферограмм можно внести не скомпенсированные aberrации системы регистрации многоэкспозиционных голограмм и системы перезаписи голографических структур в конечную интерферограмму (рис. 3, *b*). Величина таких не скомпенсированных aberrаций будет определяться как величиной разворота, так и видом функции  $\varphi$ .

## Заключение

Из полученных интерферограмм видно, что неоднородности подложек многоэкспозиционных голограмм устранены полностью, а чувствительность измерений увеличена и достаточна для количественной оценки изменения распределения температурных полей в исследуемой стеклянной подложке. Следует отметить, что в случае недостаточной чувствительности измерений перезаписанные голографические структуры на новых носителях вида (6) и (11) могут быть перезаписаны как в некогерентном, так и когерентном свете для достижения достаточной чувствительности измерений по методикам, описанным в работе [17].

Работа выполнена в рамках межвузовской программы „Пучковые взаимодействия“ при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

## Список литературы

- [1] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [2] *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
- [3] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [4] *Bryngdahl O., Lohmann A.W.* // J. Opt. Soc. Amer. 1968. Vol. 58. N 1. P. 141–142.
- [5] *Matsumotto K., Takashima M.J.* // J. Opt. Soc. Amer. 1970. Vol. 60. N 1. P. 30–33.
- [6] *Швидер Ж.* // Мат. III Всесоюз. школы по голографии. Л., 1972. С. 247–252.
- [7] *Зейликович И.С., Пулькин С.А.* // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. № 4. С. 588–589.
- [8] *Афанасьева В.А., Мустафин Л.Т., Селезнев В.А.* // Опт. и спектр. 1974. Т. 37. № 4. С. 788–789.
- [9] *Shufen Fu, Jianwen Chen* // Opt. Commun. 1988. Vol. 67. N 6. P. 417–420.
- [10] *Апостол Д., Барбулеску Д., Комисарова И.И.* и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 11. С. 2156–2161.
- [11] *Vasiljev S.V., Ivanov A.Y., Nedolugov V.I.* // Interferometry'94: New Techniques and Analysis in Optical Measurements. Proc. SPIE. 1994. Vol. 2340. P. 454–460.
- [12] *Кольер Р., Беркхарт К., Лин. Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 735 с.
- [13] *Захаров Ю.Н., Менсов С.Н.* Физические основы и прикладные вопросы голографии. Л.: ЛИЯФ, 1984. С. 138–141.
- [14] *Оптическая обработка информации / Под ред. Д. Кейсента.* М.: Мир, 1980. 349 с.
- [15] *Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда.* М.: Мир, 1982. Т. 2. 735 с.
- [16] *Зейликович И.С.* // Опт. и спектр. 1980. Т. 49. № 2. С. 396–398.
- [17] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // УФН. 1991. Т. 161. № 1. С. 143–164.
- [18] *Ляликов А.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 12. С. 72–75.
- [19] *Зейликович И.С., Ляликов А.М., Сигов В.В.* // А.С. № 1368624. БИ.1988. № 3.