

05;07;12

## Визуализация деформаций диффузно рассеивающих поверхностей при оптической обработке снимков спроецированных полос с использованием пространственной фильтрации

© А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 21 февраля 1996 г. В окончательной редакции 16 декабря 1996 г.)

Предложен метод визуализации деформированных зон диффузно рассеивающих поверхностей. Метод основан на пространственной фильтрации волны, дифрагированной на снимке спроецированных полос исследуемой поверхности. Рассмотрены особенности визуализации деформаций как для случая плоской, так и неплоской поверхностей. Приведены результаты экспериментального апробирования разработанного метода при визуализации деформаций плоской алюминиевой пластины.

### Введение

При изучении малых смещений, а также деформаций поверхности голографическая интерферометрия считается наиболее чувствительным бесконтактным методом контроля [1,2]. Однако голографическая интерферометрия во многих случаях оказывается излишне чувствительной при исследовании реальных объектов. Для визуализации сравнительно больших смещений диффузно рассеивающих объектов отдают предпочтение методам спекл-фотографии или спекл-голографии, позволяющим регулировать чувствительность измерений довольно в широком диапазоне [3–5]. К отдельной группе визуализации смещений и деформаций поверхности следует отнести методы проекции полос или нанесения сеток на исследуемую диффузно рассеивающую поверхность [6,7]. Для реализации этих методов в отличие от вышерассмотренных не требуются когерентные источники света. Кроме этого, предпочтение методам проекции полос отдают при исследовании нормальных смещений поверхности, превышающих величину десятки микрометров.

Несмотря на различия в реализации вышерассмотренных методов исследования диффузно рассеивающих объектов, общим для них является введение несущей пространственной частоты при регистрации, а также использование явления дифракции и пространственной фильтрации на этапе визуализации зон смещения и деформаций исследуемой поверхности [8].

При исследовании плоских пластин, балок и т. д. основную информацию о деформациях и напряжениях поверхности несут первые производные  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  от нормальных смещений  $\omega(x, y)$ , причем оси  $Ox$  и  $Oy$  лежат в плоскости исследуемой поверхности [7]. Полосы двухэкспозиционной голограммы, наблюдаемые при восстановлении нормально к пластине, представляют собой линии постоянных нормальных смещений  $\omega(x, y)$ . Муаровые полосы, наблюдаемые при визуализации деформированной плоской поверхности методом проекции полос, также описывают нормальные смещения исследуемой поверхности.

Наиболее простой метод дифференцирования данных о смещениях является оптическое дифференцирование интерферограмм или муаровых картин [7,9]. Причем оптическое дифференцирование как при использовании оптического сдвига, так и переналожения интерферограмм применимо в реальном времени [10].

В данной работе на основе оптической обработки снимков спроецированных полос с использованием пространственной фильтрации показана возможность визуализации деформированных зон диффузно рассеивающих поверхностей.

Ранее оптическая обработка двухэкспозиционных голограмм, а также спекл-фотографий с использованием пространственной фильтрации применялась для вычитания изображений, а также разделения информации о деформации и поступательном смещении исследуемого объекта [5,11–13].

Рассмотрим оптическую обработку снимков спроецированных полос в монохроматическом свете для случая одиночного снимка и для пары снимков, установленных в оптически сопряженных плоскостях.

### Оптическая обработка одиночного снимка

Предположим, что объектом исследования является плоская диффузно рассеивающая поверхность. После деформации ее поверхность будет отличаться от плоской. Для упрощения выкладок предположим, что оптическая ось фотографирующей системы для регистрации снимка спроецированных полос нормальна к исследуемой плоской поверхности, при этом линейное увеличение фотографирующей системы равно единице, а плоскость  $xOy$  параллельна как исследуемой плоской поверхности, так и плоскости регистрации снимка спроецированных полос. В этом случае амплитудное пропускание снимка спроецированных полос, например, при ориентации

спроецированных полос параллельно оси  $Ox$  можно представить в виде [7,14]

$$\tau(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi y}{T} + \Phi(x, y) \right] \right\}^{-\gamma/2}, \quad (1)$$

где  $T$  — период наблюдаемых полос в области плоской поверхности объекта,  $\gamma$  — коэффициент контрастности фотоэмульсии.

В выражении (1) фаза  $\Phi(x, y)$  определяется как

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi\omega(x, y) \operatorname{tg} \Theta}{T}, \quad (2)$$

где  $\omega(x, y)$  — нормальное смещение исследуемой поверхности в следствие деформации объекта;  $\Theta$  — угол между проектируемыми плоскостями теней, создающих на объекте систему полос, и нормалью к плоской поверхности объекта.

Выражение (1) для амплитудного пропускания снимка спроецированных полос, как это было отмечено в работе [14], по своему виду соответствует амплитудному пропусканию голограммы фазового объекта, записанной с плоскими волновыми фронтами, где  $\Phi(x, y)$  описывает изменение фазы плоской волны, вызванное фазовым объектом. Проведение такой аналогии в амплитудных пропусканиях снимка спроецированных полос и голограммы фазового объекта, позволило использовать хорошо развитые в голографической интерферометрии фазовых объектов методы извлечения информации о распределении фазы, например, для визуализации формы рельефа диффузно рассеивающих поверхностей [14,15].

Из выражения (2) видно, что от производных фазы  $\Phi(x, y)$  легко перейти к интересующим нас величинам  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  определяющих деформации исследуемой диффузно рассеивающей поверхности. Ввиду того что изменение интенсивности по полю в волне, дифрагированной на снимке спроецированных полос, более существенно, чем в волне, восстановленной с голограммы фазового объекта, для количественной оценки производной фазы  $\Phi(x, y)$  могут быть выбраны только те теневые методы [16,17], для которых неравномерность интенсивности в волне не влияет на измеряемые величины производных фазы  $\Phi(x, y)$ . Таким образом, для количественной оценки  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  могут быть применены теневые методы с визуализирующей диафрагмой в виде дифракционной решетки, нити или щели, производящей пространственную фильтрацию в фурье-плоскости объектива. Из перечисленных видов пространственных фильтров, по мнению автора, следует отдать предпочтение щели как наиболее универсальному фильтру, позволяющему легко регулировать ширину спектра выделяемых пространственных частот [18].

На рис. 1, а приведена оптическая схема устройства оптической обработки снимков спроецированных полос, позволяющего визуализировать деформированные зоны исследуемой диффузно рассеивающей поверхности. Снимок спроецированных полос 4 освещается коллимированным пучком света от точечного источника света,

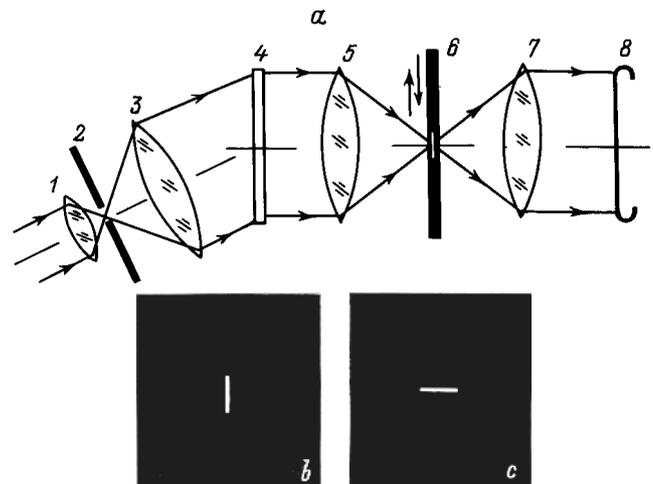


Рис. 1. Оптическая схема устройства оптической обработки снимков спроецированных полос (а) и ориентация щелевой визуализирующей диафрагмы для визуализации  $\partial\omega/\partial x$  (b) и  $\partial\omega/\partial y$  (c).

который формируется в задней фокальной плоскости микрообъектива 1 и выделяется круговой диафрагмой 2 малого диаметра  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Микрообъектив 1 и объектив 3 образуют телескопическую систему. Предположим, что при освещении снимка 4 монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda$  выполняется условие  $\cos \alpha_0 = n\lambda/T$ , где  $\alpha_0$  — угол между направлением распространения волны и осью  $Oy$ , а  $n = 1, 2, 3, \dots$ . В этом случае волна, дифрагированная в  $n$ -м порядке, будет распространяться вдоль нормали к снимку 4. Фаза дифрагированной волны определится как  $[n\Phi(x, y)]$ . Эта волна фокусируется объективом 5 и в фурье-плоскости последнего перекрывается узкой щелевой диафрагмой 6, за которой расположен объектив 7. Волны, дифрагированные в другие порядки, перекрываются непрозрачной частью визуализирующей диафрагмы 6.

Используя аналогию рассматриваемого случая оптической обработки снимка вида (1) с теневыми методами исследования волнового фронта, восстановленного голограммой фазового объекта, можно связать величины  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$ , со смещениями  $l_x$  и  $l_y$  изображения точечного источника в фурье-плоскости объектива 5

$$\frac{\partial\omega}{\partial x} \approx \frac{Tl_x}{f\lambda \operatorname{tg} \Theta}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial y} \approx \frac{Tl_y}{f\lambda \operatorname{tg} \Theta}, \quad (4)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива 5, величины  $l_x$  и  $l_y$  измеряются вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  соответственно.

На рис. 1 приведены ориентации щелевой диафрагмы для визуализации соответствующих производных от смещения поверхности:  $\partial\omega/\partial x$  (b) и  $\partial\omega/\partial y$  (c). В первом случае кромки щели ориентируют строго параллельно оси  $Oy$ , а в другом случае — оси  $Ox$ .

Измерения первых производных  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$ , характеризующих деформацию диффузно рассеивающей поверхности, производят следующим образом. Перемещением визуализирующей щелевой диафрагмы  $\delta$  добиваются визуализации в плоскости  $\delta$  только тех зон изображения исследуемой поверхности, где величина  $\partial\omega/\partial x = 0$  для ориентации щелевой визуализирующей диафрагмы (рис. 1, *b*) и  $\partial\omega/\partial y = 0$  для ориентации диафрагмы (рис. 1, *c*). В этих случаях в плоскости наблюдения  $\delta$  будут освещены только недеформированные зоны исследуемой поверхности. Затем, дискретно сканируя визуализирующей щелью в направлении, перпендикулярном кромкам щели, визуализируют деформированные зоны исследуемой поверхности. Таким образом, получают серию картин визуализирующих в плоскости  $\delta$  деформированные зоны поверхности, а величины первых производных  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  определяют по измеренным величинам  $l_x$  и  $l_y$  смещения визуализирующей щели относительно положения визуализации недеформированных зон поверхности.

## Оптическая обработка пары снимков

Вышеописанный метод визуализации деформированных зон диффузно рассеивающей поверхности пригоден только для случая, когда поверхность до деформации была плоской. Для случая неплоской поверхности при визуализации зон с постоянными величинами первых производных от нормального смещения необходимо учитывать первоначальную форму рельефа, а точнее первые производные отклонения рельефа исследуемой поверхности  $L(x, y)$  от плоской поверхности сравнения, т.е.  $\partial L/\partial x$  и  $\partial L/\partial y$ .

Влияние первых производных отклонения рельефа исследуемой поверхности от плоской поверхности сравнения на визуализацию деформированных зон неплоской поверхности можно сравнить с влиянием aberrаций системы регистрации голограмм фазового объекта при визуализации углов отклонения световых лучей фазовым объектом [18]. Очевидно, если справедливы условия

$$\left| \frac{\partial\omega}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial L}{\partial x} \right|, \quad \left| \frac{\partial\omega}{\partial y} \right| \gg \left| \frac{\partial L}{\partial y} \right|, \quad (5)$$

то отклонением рельефа поверхности  $L(x, y)$  от плоскости при визуализации деформаций можно пренебречь.

На рис. 2 приведена оптическая схема обработки снимков спроецированных полос, позволяющая вычлест влияние рельефа исследуемой неплоской поверхности.

Предположим, что зарегистрирована пара снимков спроецированных полос до и после деформации неплоской диффузно рассеивающей поверхности. Амплитудные пропускания таких снимков описываются выражением (1), причем фазы для первого и второго снимков соот-

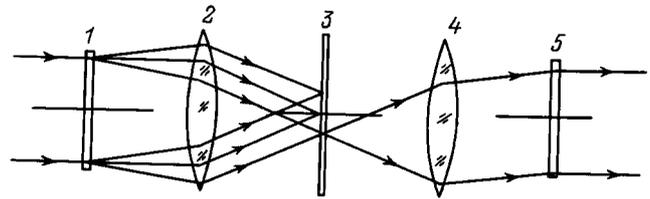


Рис. 2. Оптическая схема обработки пары снимков спроецированных полос.

ветственно равны

$$\Phi_1(x, y) = \frac{2\pi L(x, y) \operatorname{tg} \Theta}{T}, \quad (6)$$

$$\Phi_2(x, y) = \frac{2\pi [L(x, y) + \omega(x, y)] \operatorname{tg} \Theta}{T}. \quad (7)$$

Для исключения влияния  $L(x, y)$  на форму исследуемого волнового фронта пара снимков устанавливается в оптически сопряженных плоскостях 1 и 5 (рис. 2). Оптическое сопряжение снимков обеспечивается телескопической системой 2, 4 с однократным увеличением.

Можно показать [15], что при освещении по нормали первого снимка 1 в данной схеме оптической обработки по нормали к второму снимку 5 будет распространяться волна, фаза которой определится разностью  $\{n[\Phi_2(x, y) - \Phi_1(x, y)]\}$ , где  $n$  — порядок дифракции, выделяемый в фурье-плоскости объектива 2 круговой фильтрующей диафрагмой 3. В этом случае, согласно (6), (7), фаза волны будет определяться только смещением  $\omega(x, y)$  вследствие деформации исследуемой неплоской поверхности.

Для визуализации деформаций неплоских поверхностей оптическая схема устройства (рис. 1, *a*) вместо снимка 4 дополняется схемой обработки пары сопряженных снимков (рис. 2). При этом следует заметить, что оптические оси осветительной и приемной систем устройства в отличие от случая обработки одиночного снимка совпадают. Это следует учитывать при экспериментальной реализации метода.

Для определения величины  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  в визуализируемых областях изображения неплоской поверхности по известным значениям смещений визуализирующей щели  $l_x$  и  $l_y$  относительно положения настройки используют формулы (3) и (4).

Оценка погрешности измерения величин  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  при оптической обработке как одного, так и пары снимков спроецированных полос может быть проведена аналогично оценке разрешающей способности монохроматора [19,20] в силу практической эквивалентности оптических схем. Погрешность измерения величин первых производных от нормального смещения поверхности будет определяться погрешностью определения пространственной координаты положения щели относительно положения настройки, т.е.  $\delta l_x$  и  $\delta l_y$ . На погрешность определения координат влияет такой фактор, как

конечность ширины изображения точечного источника света. Это связано как с дифракционными явлениями из-за конечной ширины световых пучков, так и с aberrациями оптических элементов системы оптической обработки снимков. Для широкой щели визуализирующей диафрагмы дифракционными явлениями, а также aberrациями оптической системы можно пренебречь. В этом случае точность измерений  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  будет определяться шириной визуализирующей щели  $\Delta l$ . Из простых соображений ясно, что величина пространственной координаты в фурье-плоскости объектива не может быть измерена точнее  $\Delta l$ . В этом случае погрешности измерения  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  определяются как

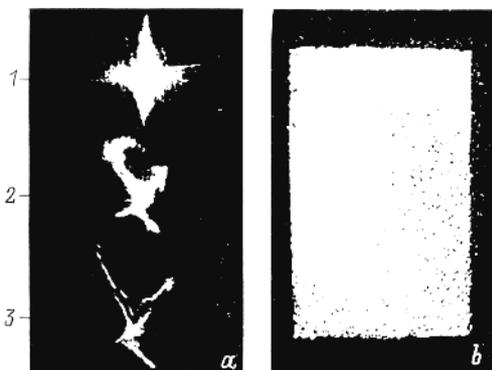
$$\delta(\partial\omega/\partial x) = \delta(\partial\omega/\partial y) \approx \frac{T \Delta l}{n \lambda f \operatorname{tg} \Theta}. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что погрешность измерений  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  обратно пропорциональна используемому порядку дифракции  $n$  волны, дифрагированной на обрабатываемых снимках спроецированных полос.

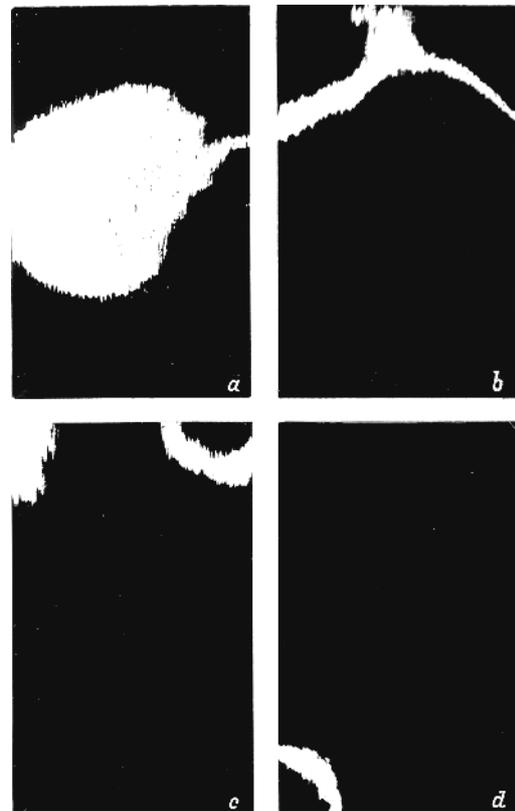
### Экспериментальная апробация

Разработанная методика визуализации деформаций диффузно рассеивающих поверхностей при оптической обработке снимков спроецированных полос была экспериментально опробована при визуализации деформированных зон плоской алюминиевой прямоугольной пластины, которая подвергалась сильным деформациям.

Снимки спроецированных полос регистрировались при проецировании на исследуемую пластину системы интерференционных полос, образованных в интерферометре Маха-Цендера при освещении последнего когерентным светом от гелий-неонового лазера. Спроецированные полосы ориентировались перпендикулярно оси  $Oy$ . Снимки регистрировались на высоко разрешающую фотоэмульсию "Микрат-изопан" фотокамерой "Зенит" с объективом "Гелиос-44М" при относительном



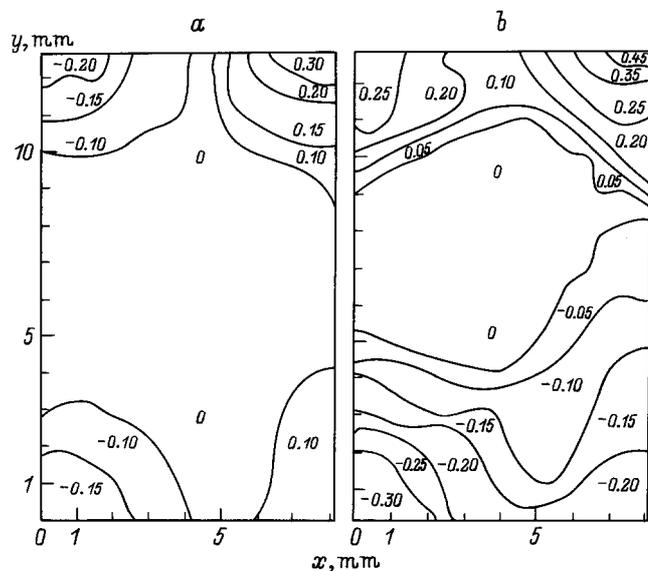
**Рис. 3.** Участок дифракционного спектра (а) и картина, наблюдаемая в плоскости визуализации при полном выделении широкой щелью +1-го порядка дифракции (b). 1 — нулевой порядок, 2 — +1-й, 3 — +2-й.



**Рис. 4.** Картины, визуализирующие деформированные зоны тонкой алюминиевой пластины с различными значениями  $\partial\omega/\partial y$ .

отверстия 1 : 8. Оптическая ось фотографирующей системы совпала с нормалью к плоской недеформированной поверхности пластины. Период визуализируемых спроецированных полос на деформированных зонах объекта составлял величину 0.12 mm. При оптической обработке снимка спроецированных полос по схеме, приведенной на рис. 1, а, в качестве когерентного источника света использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-125. На рис. 3, а приведен участок дифракционного спектра, наблюдаемого в фурье-плоскости объектива 5 (рис. 1, а). Наиболее яркий порядок дифракции соответствует прямопрошедшей волне, т. е. дифрагированной в нулевой порядок. На рис. 3, b приведена картина, наблюдаемая в плоскости  $\delta$  (рис. 1, а) при полном выделении широкой щелью в плоскости фильтрации  $b$  +1-го порядка дифракции. Данная картина показывает практически равномерную освещенность всего изображения поверхности исследуемой пластины.

Визуализация деформированных зон исследуемой пластины производилась при дискретном сканировании узкой щелью шириной 50  $\mu\text{m}$  +1-го дифракционного максимума. Шаг сканирования составлял 50  $\mu\text{m}$ . На рис. 4 приведены картины, наблюдаемые в плоскости  $\delta$  (рис. 1, а), и визуализирующие зоны изображения исследуемой пластины с различной степенью деформаций. Величина  $\partial\omega/\partial y$  равна 0 (а), 0.10 (b), 0.25 (c, d).



**Рис. 5.** Изолинии постоянных значений  $\partial\omega/\partial x$  (а) и  $\partial\omega/\partial y$  (б) исследуемой алюминиевой пластины.

Картина, приведенная на рис. 4, а соответствует визуализации недеформированной зоны исследуемой пластины. На рис. 5 приведены картины изолиний исследуемой деформированной пластины с постоянными величинами  $\partial\omega/\partial x$  (а) и  $\partial\omega/\partial y$  (б). Графики построены по сериям фотографий, визуализирующих деформированные зоны изображения пластины.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет не только визуализировать деформированные зоны исследуемых диффузно рассеивающих поверхностей, но и производить количественную оценку степени деформации.

## Список литературы

- [1] Hidebrand B.P., Halmes K.A. // Appl. Opt. 1966. Vol. 5. N 4. P. 595–602.
- [2] Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. // ЖТФ. 1967. Т. 37. Вып. 2. С. 360–369.
- [3] Власов Н.Г. // Материалы V Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1973. С. 293–303.
- [4] Власов Н.Г., Пресняков Ю.П., Смирнова С.Н. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 5. С. 1104–1106.
- [5] Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 222 с.
- [6] Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Роберта К. Эрфа. М.: Машиностроение. 1979. 446 с.
- [7] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [8] Власов Н.Г., Скоцкий Г.В. // Материалы VI Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1974. С. 165–175.
- [9] Patorski K., Kujawinska M. // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. N 7. P. 3041–3048.
- [10] Patorski K., Post D., Cramek R., Cuo Yifan // Appl. Opt. 1987. Vol. 26. N 10. P. 1977–1982.

- [11] Archbold E., Ennos A.E. // Opt. Acta. 1972. Vol. 19. N 4. P. 253–271.
- [12] Клименко И.С., Рябухо В.П., Федуляев Б.В., Лохова Н.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 5. С. 888–891.
- [13] Клименко И.С., Рябухо В.П. // Прикладные вопросы голографии. Материалы XIV Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1982. С. 62–79.
- [14] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1993. Т. 74. Вып. 5. С. 865–869.
- [15] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. Вып. 6. С. 959–963.
- [16] Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
- [17] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.И. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [18] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1995. Т. 78. Вып. 3. С. 524–528.
- [19] Тарасов К.И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1977. 367 с.
- [20] Скоков И.В. Оптические спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1984. 240 с.