

09

Интерферометрия, объединяющая процедуры измерения и контроля клиновидности прозрачных пластин

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
230023 Гродно, Белоруссия
e-mail: amlialikov@grsu.by

(Поступило в Редакцию 9 августа 2013 г.)

Предложены различные варианты и схемы реализации интерференционного метода, позволяющего объединить процедуры измерения и контроля параметров фазовых объектов, для случая измерительного контроля прозрачных клиновидных пластин. Приведены результаты экспериментального опробования предложенных вариантов реализации измерительного контроля для стеклянных клиновидных пластин.

Введение

При определении качества изготавливаемых оптических элементов приходится сталкиваться с объединением таких измерительных процедур как измерение и контроль параметра. Если результатом измерения является числовое значение параметра объекта, то процедура контроля предполагает только определение соответствия этого параметра норме [1].

Для определения качества клиновидных пластин объединение данных измерительных процедур необходимо в случаях получения одновременно информации о результатах измерения величины угла клина и контроля качества поверхности клиновидной пластины, установления знака, а также величины отклонения угла от нормы. Из большого разнообразия существующих оптических способов измерения и контроля угла клина прозрачных пластин [2–4] интерференционные способы признаны наиболее полно отвечающими таким требованиям.

Существует несколько интерференционных способов измерения угла клина. Самым простым является способ формирования интерференционных картин световыми пучками, отраженными от поверхностей клиновидной пластины, либо при интерференции пучков, отклоненных клиновидной пластиной [3,5]. К настоящему времени уже создано большое количество методик интерференционного измерения клиновидности пластин, которые реализуется в двулучевых интерферометрах как с совмещенными, так и разнесенными каналами, а также в сдвиговых интерферометрах [3–12]. Данные методики измерений отличаются по сложности реализации, чувствительности и погрешности измерений величины угла клина.

В интерферометрических методах процедура контроля формы поверхности оптических элементов обычно требует использования эталонного элемента при формировании интерференционной картины. Здесь можно выделить те интерференционные методы контроля на базе двулучевых интерферометров и интерферометров сдвига, для которых формируется интерференционная картина объектным и эталонным световыми пучками,

и отображающая результат отличия формы волновых фронтов световых волн, сформированных посредством контролируемого и эталонного элементов [3,4,13–15].

Возможность объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях определенного класса фазовых объектов, для которых исследуемый параметр постоянен в плоскости, перпендикулярной направлению распространения зондирующей световой волны, впервые был обоснован автором и экспериментально подтвержден для прозрачных клиновидных пластин [16]. В работе было показано, что для таких объектов при их интерференционном исследовании возможно в интерференционной картине формирование нескольких независимых интерферограмм, соответствующих зонам измерения и зонам контроля параметра.

В настоящей работе рассмотрены и экспериментально опробованы различные варианты и схемы реализации интерференционного метода, позволяющего объединить процедуры измерения и контроля фазовых объектов, для случая измерительного контроля прозрачных клиновидных пластин.

Классическая двулучевая интерферометрия

Рассмотрим вариант реализации объединения процедуры измерения и контроля клиновидности прозрачных пластин для классических двулучевых интерферометров типа Маха–Цендера или Майкельсона. Для таких интерферометров характерной особенностью является пространственное разнесение объектного и опорного каналов. При реализации измерительного контроля исследуемая и эталонная клиновидные пластины могут быть расположены соответственно в объектном и опорном каналах в пространственно разнесенных плоскостях.

На рис. 1 изображена оптическая схема, выполненная на основе интерферометра Маха–Цендера. Коллимированный световой пучок, сформированный лазерным источником света 1 и телескопической системой 2 и 3, направляется в интерферометр Маха–Цендера, образован-

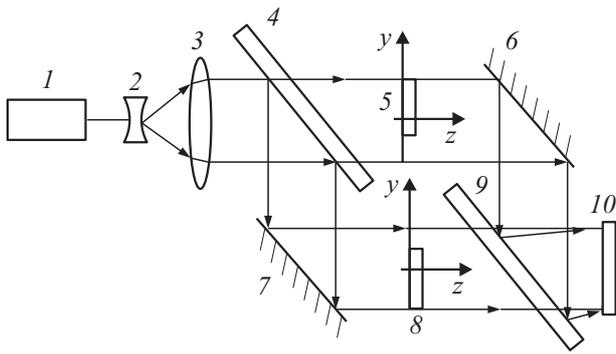


Рис. 1. Оптическая схема, выполненная на основе интерферометра Маха-Цендера: 1 — лазерный источник света, 2, 3 — телескопическая система, 4, 9 — полупрозрачные пластины и 6, 7 — зеркала интерферометра Маха-Цендера, 5 и 8 — исследуемая и эталонная клиновидные пластины, 10 — фоторегистратор интерференционной картины.

ный полупрозрачными пластинами 4, 9 и зеркалами 6, 7. Перед началом исследований интерферометр настраивается таким образом, чтобы на выходе зеркала 9 интерферирующие световые пучки распространялись строго параллельно друг другу и в плоскости формирования интерференционной картины на фоторегистраторе 10 наблюдалась равномерная освещенность. Реализация такого условия соответствует получению полос равного наклона [17] или настройке интерференционной картины на полосу бесконечной ширины [18].

В объектном канале интерферометра размещается исследуемая 5, а в опорном — эталонная 8 стеклянные клиновидные пластины таким образом, чтобы нормали к поверхностям пластин были ориентированы вдоль направления распространения световых пучков (ось z). Ребра клиньев пластин ориентируются параллельно друг другу, например, параллельно оси y . Клиновидные пла-

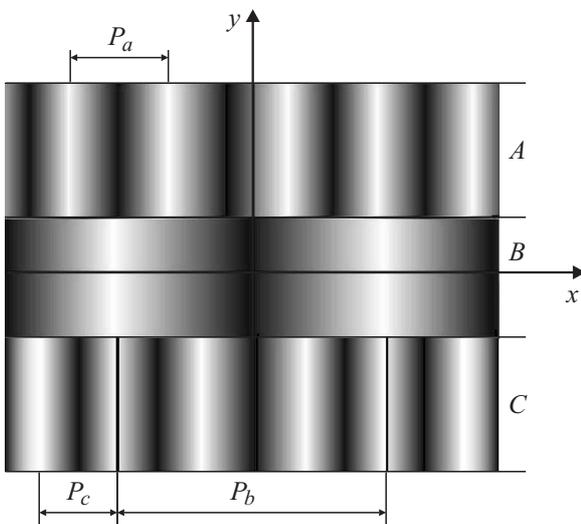


Рис. 2. Вид интерференционной картины, наблюдаемой в плоскости фоторегистратора 10 (рис. 1).

стины в объектном и опорном каналах необходимо разместить относительно интерферирующих световых пучков таким образом, чтобы в плоскости фоторегистратора 10, где происходит формирование интерференционной картины, присутствовали зоны, как свободные от наложения контуров исследуемой и эталонной пластин, так и зоны их совмещения. Пример такого размещения клиновидных пластин приведен на рис. 1. Пластины 5 и 8 располагают по отношению к световым пучкам таким образом, чтобы оставались не полностью занятыми зоны пучков, соответствующие III и IV квадрантам плоской системы координат для объектного и I и II для опорного пучков. На рис. 2 схематически приведена интерференционная картина, наблюдаемая в плоскости фоторегистратора 10 (рис. 1) для случая такого расположения исследуемой 5 и эталонной 8 пластин в интерферометре. Контур исследуемой клиновидной пластины ограничен зонами А и В, а эталонной — В и С. В этом случае фазы объектной $\Phi_c(x, y)$ и опорной $\Phi_m(x, y)$ волн можно представить как

$$\Phi_c(x, y) \sim \begin{cases} \varphi_c + \varepsilon_c & \text{для зоны А,} \\ \varphi_c + \varepsilon_c & \text{для зоны В,} \\ \varepsilon_c & \text{для зоны С,} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_m(x, y) \sim \begin{cases} \varepsilon_m & \text{для зоны А,} \\ \varphi_m + \varepsilon_m & \text{для зоны В,} \\ \varphi_m + \varepsilon_m & \text{для зоны С,} \end{cases} \quad (2)$$

где ε_c и ε_m — функции, описывающие фазы объектной и опорной световых волн в плоскости xu на входе в исследуемую и эталонную клиновидные пластины, φ_c и φ_m — функции, описывающие изменения фаз световых волн при прохождении исследуемой и эталонной клиновидных пластин.

Распределение освещенности в интерференционной картине в плоскости фоторегистратора 10 (рис. 1) определится известным для интерферометрии [18] выражением

$$I(x, y) \sim 1 + \cos[\Phi_c(x, y) - \Phi_m(x, y)]. \quad (3)$$

С учетом выражений (1) и (2) функция $\Psi(x, y) = \Phi_c(x, y) - \Phi_m(x, y)$, определяющая распределение освещенностей в интерференционной картине для зон измерения и контроля, может быть представлена в следующем виде:

$$\Psi(x, y) \sim \begin{cases} \varphi_c + \Delta\varepsilon_{c,m} & \text{для зоны А,} \\ \Delta\varphi_{c,m} + \Delta\varepsilon_{c,m} & \text{для зоны В,} \\ \varphi_m + \Delta\varepsilon_{c,m} & \text{для зоны С,} \end{cases} \quad (4)$$

где функция $\Delta\varepsilon_{c,m} = \varepsilon_c - \varepsilon_m$ определяет искривление полосы, вызванных aberrациями объектной и опорной ветвей интерферометра, а $\Delta\varphi_{c,m} = \varphi_c - \varphi_m$ — отличие угла клиновидности исследуемой пластины от эталонной.

Если перед началом измерений пустой интерферометр был настроен на бесконечно широкую полосу и в случае

малых углов клиновидности γ_c и γ_m исследуемой и эталонной пластин, при описании интерференционной картины можно считать

$$\begin{aligned} \varepsilon_c - \varepsilon_m &= \Delta\varepsilon_{c,m} + \frac{2\pi}{\lambda} K, \\ \varphi_c &= \frac{2\pi\gamma_c(n-1)x}{\lambda}, \\ \varphi_m &= \frac{2\pi\gamma_m(n-1)x}{\lambda}, \end{aligned} \quad (5)$$

где K — константа, определяющая разность хода между объектным и опорным пучками в плоскости интерференционной картины и не влияющая на результат измерения и контроля (она может быть приравнена нулю), n — показатель преломления материала клиновидных пластин, λ — длина волны лазерного источника света I (рис. 1). Согласно выражениям (3)–(5), распределение освещенности в зонах измерения и контроля в интерференционной картине может быть представлено следующим выражением:

$$I(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \cos\left(\frac{2\pi\gamma_c(n-1)x}{\lambda} + \Delta\varepsilon_{c,m}\right) & \text{для зоны А,} \\ 1 + \cos\left(\frac{2\pi(\gamma_c - \gamma_m)(n-1)x}{\lambda} + \Delta\varepsilon_{c,m}\right) & \text{для зоны В,} \\ 1 + \cos\left(\frac{2\pi\gamma_m(n-1)x}{\lambda} + \Delta\varepsilon_{c,m}\right) & \text{для зоны С.} \end{cases} \quad (6)$$

При этом следует заметить, что выражение (6) для зоны контроля (зона В) справедливо только в случае равенства показателей преломления исследуемой и эталонной клиновидных пластин.

При формировании интерференционных картин в зонах измерения и контроля из-за aberrаций интерферометра, определяемых функцией $\Delta\varepsilon_{c,m}$, происходит искажение интерференционных полос, что снижает точность измерений и достоверность контроля угла клина. Очевидно, на практике при измерительном контроле клиновидных пластин углы клиновидности исследуемой и эталонной клиновидных пластин отличаются на малую величину, и в этом случае справедливо неравенство $\gamma_c - \gamma_m \ll \gamma_c$. На основании этого можно утверждать, что наибольшее влияние данные aberrации оказывают на достоверность контроля вследствие возможной соизмеримости полезного сигнала (первый член под косинусом) и искажений, создаваемых aberrациями $\Delta\varepsilon_{c,m}$ для зоны В. Этими искажениями можно пренебречь в случае

$$\frac{2\pi(\gamma_c - \gamma_m)(n-1)x}{\lambda} \gg \Delta\varepsilon_{c,m}. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) измеряемые периоды P_a , P_b и P_c интерференционных полос интерферограмм, расположенных в зонах А, В и С (рис. 2), связаны с параметрами исследуемой и эталонной клиновидных пластин следующими уравнениями:

$$\gamma_c = \frac{\lambda}{(n-1)P_a}, \quad (8)$$

$$\gamma_c - \gamma_m = \frac{\lambda}{(n-1)P_b}, \quad (9)$$

$$\gamma_m = \frac{\lambda}{(n-1)P_c}. \quad (10)$$

Из рис. 2 видно, что в интерференционной картине существуют зоны, в которых контуры исследуемой (зона А) и эталонной (зона С) пластин не накладываются друг на друга. В этих зонах образуются интерферограммы, по которым возможно определение угла клина исследуемой и соответственно эталонной клиновидных пластин, используя уравнения (8) и (10). В зоне В происходит наложение контуров исследуемой и эталонной пластин, и интерферограмма, образованная в этой зоне, служит, согласно (9), для определения разности углов клиновидности исследуемой и эталонной пластин, т.е. для процедуры контроля. Однако на практике для реализации измерительного контроля можно ограничиться формированием только двух зон: зоны измерения угла клина исследуемой пластины и зоны контроля угла.

На рис. 3 приведены результаты исследований трех клиновидных пластин, одна из которых являлась эталонной. Угол клина эталонной пластины составлял $9'00'' \pm 10''$. Ребро клина пластин ориентировалось горизонтально. Исследуемые пластины устанавливались в объектный канал интерферометра и полностью перекрывали световой пучок, а эталонная пластина закрывала только половину пучка опорного канала, что позволило сформировать в интерференционной картине две зоны: А — измерения и В — контроля. На рис. 3 приведены интерференционные картины для двух разных исследуемых

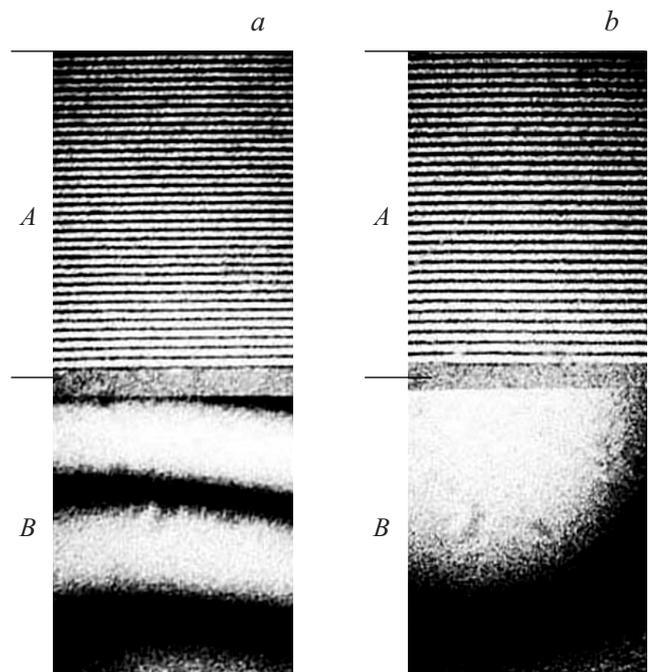


Рис. 3. Интерференционная картина для случаев отклонения угла клина исследуемой пластины от угла клина эталонной: $\gamma_c - \gamma_m \approx 50''$ (а) и $\gamma_c - \gamma_m \leq 10''$ (б).

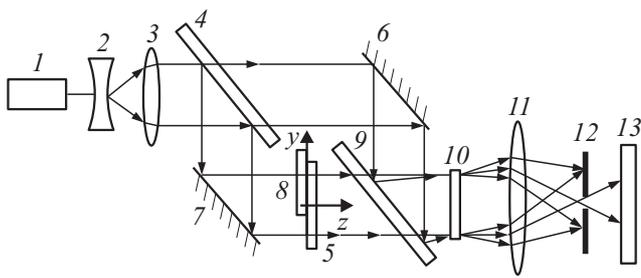


Рис. 4. Оптическая схема, голографического интерферометра: 1 — лазерный источник света, 2, 3 — телескопическая система, 4, 9 — полупрозрачные пластины и 6, 7 — зеркала интерферометра Маха-Цендера, 5 и 8 — исследуемая и эталонная клиновидные пластины, 10 — эталонная голограмма, 11 — объектив, 12 — непрозрачный экран с круговым отверстием, 13 — фоторегистратор интерференционной картины.

двух пластин, зафиксированные фоторегистратором. Зоны А интерферограмм используются для процедуры измерения угла клина исследуемой пластины, а зона В — отклонения угла клина пластины от нормы, т. е. для контроля. Отклонения углов клина исследуемых пластин от угла клина эталонной пластины составили $\gamma_c - \gamma_m \approx 50''$ (рис. 3, а) и $\gamma_c - \gamma_m \leq 10''$ (рис. 3, б). Причем положительный знак отклонения угла клина для первой исследуемой пластины был определен по интерферограмме в зоне А (рис. 3, а).

При реализации измерительного контроля исследуемая 5 и эталонная 8 клиновидные пластины (рис. 4) могут быть совмещены и расположены в одном объектном канале. В этом случае очевидно, что ребра клиньев пластин ориентируются параллельно друг другу, но таким образом, чтобы углы отклонения световых лучей пластинами были противоположны. Этот способ размещения пластин имеет ряд преимуществ по сравнению с выше рассмотренным. Для такого способа размещения пластин реализация методики объединения процедур измерения и контроля возможна в интерферометрах с совмещенными каналами формирования объектного и опорного пучков, а также в двулучевых интерферометрах, для которых параметры опорного пучка отличаются от объектного. В последнем случае могут использоваться как классические, так и голографические интерферометры с узким опорным пучком [19].

Голографическая интерферометрия

В случае заметных aberrаций условие (7) может не выполняться. Возникающие искажения полос в интерференционной картине можно компенсировать, используя эталонную голограмму. Компенсация aberrаций с помощью эталонной голограммы достаточно полно описана для двух способов голографической интерферометрии: реального времени и дифференциальной [18,19]. В нашем случае эталонная голограмма выполняет функцию

не только компенсации aberrаций во всех зонах формирования интерференционной картины, но и выступает в качестве эталона при формировании зоны контроля. Голографический вариант интерферометра позволяет использовать объектный и опорный световые пучки с отличающейся кривизной волновых фронтов.

На рис. 4 представлена оптическая схема голографического интерферометра, созданного на базе интерферометра Маха-Цендера. Оптическая схема данного интерферометра отличается от классической схемы (рис. 1) наличием эталонной голограммы 10 (рис. 4) и оптической системы пространственной фильтрации [18,19], образованной объективом 11 и непрозрачным экраном 12 с круговым отверстием. Система пространственной фильтрации предназначена для выделения дифрагированной в первом порядке волны на эталонной голограмме 10. Непрозрачный экран 12 устанавливается в задней фокальной плоскости объектива 11. Такая система пространственной фильтрации используется в способах голографической интерферометрии фазовых объектов [19].

Измерительный контроль клиновидных пластин для случая записи aberrаций и изображения эталонной клиновидной пластины на голограмму 10 реализуется в два этапа. На первом этапе в интерферометр (рис. 4) устанавливается эталонная клиновидная пластина 8 таким образом, чтобы она занимала только часть объектного светового пучка. Эталонную голограмму записывают на носителе 10. Угол голографирования, определяемый направлениями распространения объектного и опорного пучков, выбирается таким образом, чтобы частота интерференционных полос на голограмме была не менее 10 mm^{-1} . После химической обработки эталонная голограмма устанавливается в прежнее положение. Контроль точности установки производится по совмещению изображений края пластины на голограмме. При правильной установке эталонной голограммы в плоскости фоторегистратора 13 должна наблюдаться интерференционная картина в полосах бесконечной ширины в двух зонах А и В. После удаления из схемы эталонной клиновидной пластины 8 в зоне В должны появиться интерференционные полосы конечной ширины, параллельные ребру клина.

На втором этапе реализации методики измерительного контроля объектный световой пучок перекрывается исследуемой пластиной 5, а ребро клина исследуемой пластины ориентируется параллельно ребру эталонной пластины.

При апробации голографического варианта измерительного контроля использовался двулучевой интерферометр с низкокачественной оптикой. Величина максимальных aberrаций $|\Delta\epsilon_{c,m}|_{\max} > 3\lambda$. На рис. 5 приведены результаты измерительного контроля пластин малой клиновидности. Зоны измерения и контроля на интерференционных картинах отмечены соответственно А и В.

Применение эталонной голограммы позволило уменьшить влияющие величины aberrаций, определяемых функцией $\Delta\epsilon_{c,m}$, в зонах формирования интерференционной

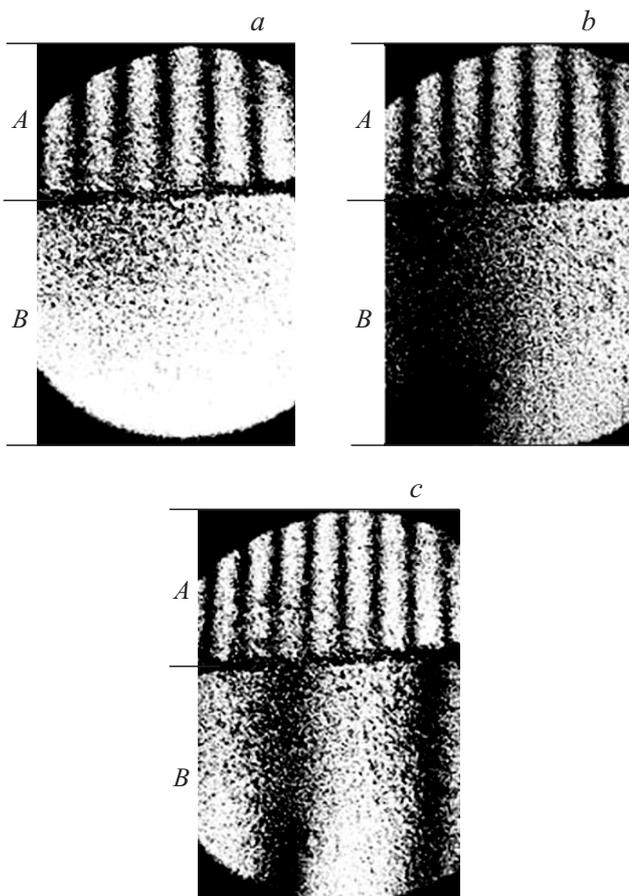


Рис. 5. Интерференционные картины результатов измерительного контроля малой клиновидности стеклянных пластин с различными значениями параметра M_γ : менее 1.5% (а), 5.0% (b) и более 20% (с).

картины А и В. Величина остаточных aberrаций при этом не превышала $\pi/10$. На рис. 5 представлены интерференционные картины результатов измерительного контроля стеклянных пластин с различным значением параметра M_γ , количественно характеризующим отклонение угла клина от нормы. Данный параметр был использован для производственного измерительного контроля клиновидных пластин, определялся, как $M_\gamma = |(\gamma_c - \gamma_m)/\gamma_m|100\%$, и составил значения менее 1.5% (рис. 5, а), 5.0% (рис. 5, b) и более 20% (рис. 5, с).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены и экспериментально опробованы различные варианты и схемы реализации интерференционного метода, позволяющего объединить процедуры измерения и контроля фазовых объектов, для случая измерительного контроля прозрачных клиновидных пластин. Использование голографического варианта измерительного контроля целесообразно только в случае не выполнения условия (7). В нашем случае применение эталонной голограммы

позволило уменьшить влияние aberrаций на точность измерительного контроля. Следует отметить, что порог обнаружения минимальной величины $|\gamma_c - \gamma_m|_{\min}$ был снижен в 30 раз, что соответственно повысило достоверность контроля клиновидных пластин.

Список литературы

- [1] Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев: Вища школа, 1983. 456 с.
- [2] Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
- [3] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [4] Оптические измерения / Под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- [5] Мошкин Б.Е., Майоров Б.С. // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24–27.
- [6] Bhattacharyya D., Ray A., Dutta B.K., Ghosh P.N. // Opt. Laser Technol. 2002. Vol. 34. N 1. P. 93–96.
- [7] Chatterjee S. // Opt. Eng. 2003. Vol. 42. N 11. P. 3235–3238.
- [8] Chatterjee S., Kumar Y.P. // Opt. Laser Technol. 2007. Vol. 39. N 3. P. 662–668.
- [9] Chatterjee S., Kumar Y.P. // Appl. Opt. 2009. Vol. 48. N 8. P. 1598–1605.
- [10] Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 20. С. 87–94.
- [11] Буть А.И., Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. N 4. С. 696–701.
- [12] Chatterjee S., Kumar Y.P. // Opt. Commun. 2011. Vol. 284. N 1. P. 57–63.
- [13] Буть А.И., Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 2012. Т. 112. № 6. С. 1018–1023.
- [14] Malacara D., Servin M., Malacara Z. Interferogram Analysis for Optical Testing. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. 568 p.
- [15] Ляликов А.М. // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 12. С. 1141–1145.
- [16] Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 13. С. 62–69.
- [17] Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. Л.: Машиностроение, 1985. 333 с.
- [18] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [19] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.