

07

Зондирование случайного фазового экрана сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком. Режим дефлексии интерференционных полос

© В.П. Рябухо, А.А. Чаусский

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов
Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию 28 июля 1998 г.

В условиях острой фокусировки на случайный фазовый экран лазерного пучка с регулярной интерференционной структурой исследован эффект дефлексии интерференционных полос в дифракционном поле и установлена аналитическая зависимость контраста полос средней интенсивности от статистических параметров экрана.

В [1,2] установлена зависимость контраста интерференционных полос средней интенсивности, формирующихся в дифракционном поле при освещении движущегося случайного фазового экрана (СФЭ) сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком (ПМЛП), от статистических параметров экрана. Предполагалось, что дифракция света происходит на большом числе неоднородностей экрана. В настоящей работе рассмотрен другой случай, когда размеры перетяжек сфокусированного ПМЛП на поверхности экрана заметно меньше поперечных размеров неоднородностей экрана — зондирующий пучок ”разрешает” неоднородности экрана. Такой режим обеспечивается острой фокусировкой ПМЛП объективом с достаточно большой числовой апертурой или при зондировании СФЭ с крупномасштабными неоднородностями. В этом режиме в дифракционном поле отсутствует спекл-модуляция, а наблюдается почти такая же картина интерференционных полос, как и в отсутствие экрана. Однако положение и частично форма полос определяются параметрами отдельной неоднородности экрана, оказавшейся под сфокусированным лазерным пучком. Поперечное смещение экрана сопровождается дефлексией интерференционных полос, обусловленной

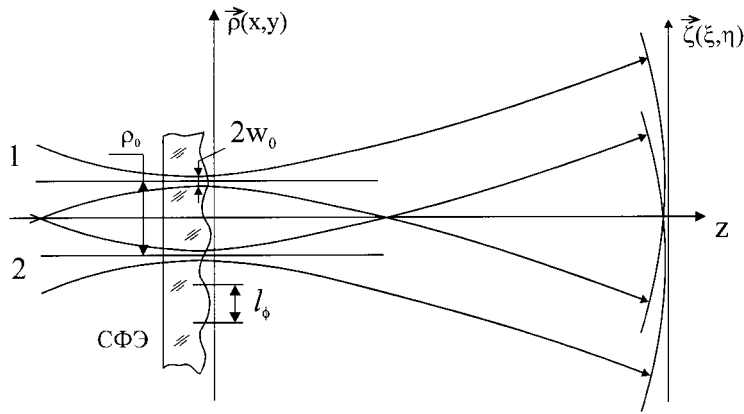


Рис. 1. Прохождение сфокусированного пространственно-модулированного лазерного пучка через СФЭ с крупномасштабными неоднородностями.

текущим изменением разности фаз интерферирующих волн. Поэтому инерционный фотоприемник зарегистрирует в дифракционном поле полосы средней интенсивности, контраст которых будет определяться статистическими характеристиками СФЭ. Цель работы — установить для режима дефлексии полос аналитическую зависимость контраста полос от статистических параметров СФЭ.

В качестве ПМЛП, как и в [1,2], рассмотрим пучок света с параллельными интерференционными полосами, образующимися при суперпозиции двух гауссовых лазерных пучков. При фокусировке такого пучка на поверхность СФЭ образуются два световых пятна диаметром $2w_0 = 2\lambda f/\pi w$ (рис. 1), расстояние между которыми ρ_0 определяется периодом полос Λ_0 , $\rho_0 = \lambda f/\Lambda_0$, где w — радиус пучка в апертуре фокусирующего объектива с фокусным расстоянием f . Будем полагать, что $2w_0$ заметно меньше поперечных размеров неоднородностей l_ϕ : $2w_0 < l_\phi$.

Поперечное смещение экрана приводит к случайному изменению фаз каждого пучка $\varphi_1(\rho + \rho_0/2)$, $\varphi_2(\rho - \rho_0/2)$ и соответствующему случайному смещению $\Delta\zeta$ интерференционных полос в дифракционном поле — происходит дефлексия интерференционных полос. Инерционный фотоприемник зарегистрирует полосы средней интенсивности,

контраст которых V меньше контраста полос освещающего пучка V_0 . Установим связь между значением контраста V и статистическими параметрами неоднородностей СФЭ: дисперсией фазовых флуктуаций σ_ϕ , радиусом корреляции неоднородностей l_ϕ , коэффициентом корреляции неоднородностей $K_\phi(\Delta\rho)$, отражающим их среднюю статистическую форму.

В области дифракции Френеля комплексные амплитуды интерферирующих полей $U_1(\zeta, z)$ и $U_2(\zeta, z)$ будут отличаться значениями амплитуд A_1 и A_2 , случайными фазовыми сдвигами φ_1, φ_2 и взаимным детерминированным фазовым набегом $\Delta\Psi(\zeta, z) = 2\pi\rho_0\zeta/\lambda z$, обусловленным взаимным поперечным сдвигом ρ_0 перетяжек пучков 1 и 2 в плоскости экрана (рис. 1). Поэтому для пространственного распределения средней интенсивности в плоскости (ζ, z) можно записать следующее выражение:

$$\begin{aligned} \langle I(\zeta, z) \rangle &= \langle |U_1(\zeta, z) + U_2(\zeta, z)|^2 \rangle \\ &= |u(\zeta, z)|^2 \left\{ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 |\mu_{12}(\rho_0)| \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{\lambda z} \rho_0 \zeta\right) \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где для освещающего гауссового пучка $|u(\zeta, z)| = (w_0/w(z)) \times \exp[-(\zeta/w(z))^2]$; $w(z)$ — радиус пучка в плоскости наблюдения (ζ, z) интерференционной картины; $\mu_{12}(\rho_0) = \langle \exp[i\Delta\varphi_{12}(\rho_0)] \rangle$ — коэффициент корреляции комплексных амплитуд интерферирующих световых полей; $\alpha = \arg\mu_{12}(\rho_0)$; $\Delta\varphi_{12}(\rho_0) = \varphi_1(\rho + \rho_0/2) - \varphi_2(\rho - \rho_0/2)$. Из (1) следует, что контраст полос средней интенсивности определяется уравнением

$$V = V_0 |\mu_{12}(\rho_0)|, \quad (2)$$

где $V_0 = 2A_1A_2/(A_1^2 + A_2^2)$ — контраст полос в отсутствие СФЭ.

В предположении о гауссовой статистике фазовых флуктуаций $\Delta\varphi_{12}(\rho_0)$ для коэффициента корреляции $\mu_{12}(\rho_0)$ можно записать выражение [3,4]

$$\mu_{12}(\rho_0) = \exp\{-\sigma_\phi^2 [1 - K_\phi(\rho_0)]\}. \quad (3)$$

Таким образом, для контраста полос средней интенсивности получили такую же зависимость от статистических параметров СФЭ, как и для полос в приграничной области при использовании широкого коллимированного ПМЛП [5]. Вместе с этим важно отметить, что

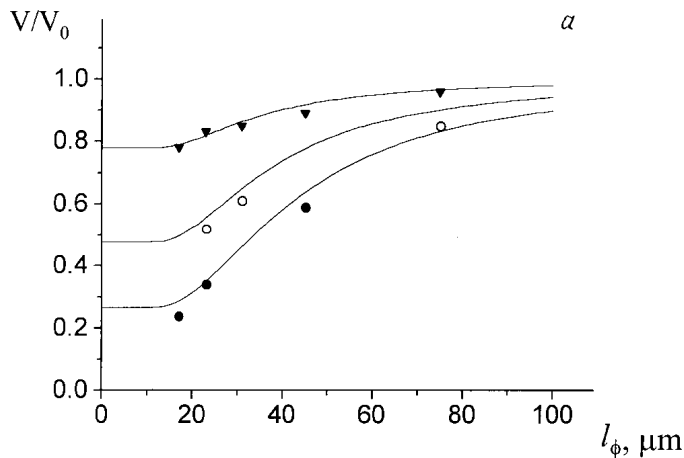


Рис. 2. Контраст полос средней интенсивности в режиме дефлексии полос, теоретические кривые и экспериментальные данные, в зависимости от статистических параметров СФЭ: *a* — в зависимости от радиуса корреляции l_ϕ неоднородностей СФЭ при $\rho_0 \approx 29 \mu\text{m}$: 1 — $\sigma_\phi = 0.5$, 2 — $\sigma_\phi = 0.86$, 3 — $\sigma_\phi = 1.15$; *b* — в зависимости от σ_ϕ при $l_\phi = 23 \mu\text{m}$: 1 — $\rho_0 = 9.5 \mu\text{m}$, 2 — $\rho_0 = 14 \mu\text{m}$, 3 — $\rho_0 = 29 \mu\text{m}$; *c* — в зависимости от ρ_0 при $l_\phi = 23 \mu\text{m}$: 1 — $\sigma_\phi = 0.5$, 2 — $\sigma_\phi = 0.86$, 3 — $\sigma_\phi = 1.15$.

полученная зависимость качественно отличается от зависимости, получаемой при дифракции сфокусированного ПМЛП на большом числе неоднородностей экрана [2]. В самом деле, изменения контраста полос V в зависимости от радиуса корреляции неоднородностей l_ϕ в этих двух случаях имеют противоположные тенденции (рис. 2, *a* настоящего сообщения и рис. 3, *b* [2]). Уменьшение V с ростом l_ϕ в режиме дифракции на большом числе неоднородностей СФЭ обусловлено увеличением средней интенсивности рассеянного компонента по отношению к интенсивности нерассеянного пучка. Увеличение V во втором режиме при увеличении l_ϕ происходит из-за уменьшения средней амплитуды дефлексии полос. На рис. 2, *a* для режима дефлексии интерференционных полос представлены графики относительно контраста полос средней интенсивности V/V_0 в зависимости от радиуса корреляции неоднородностей экрана l_ϕ в предположении, что $K_\phi(\rho_0)$ имеет гауссову

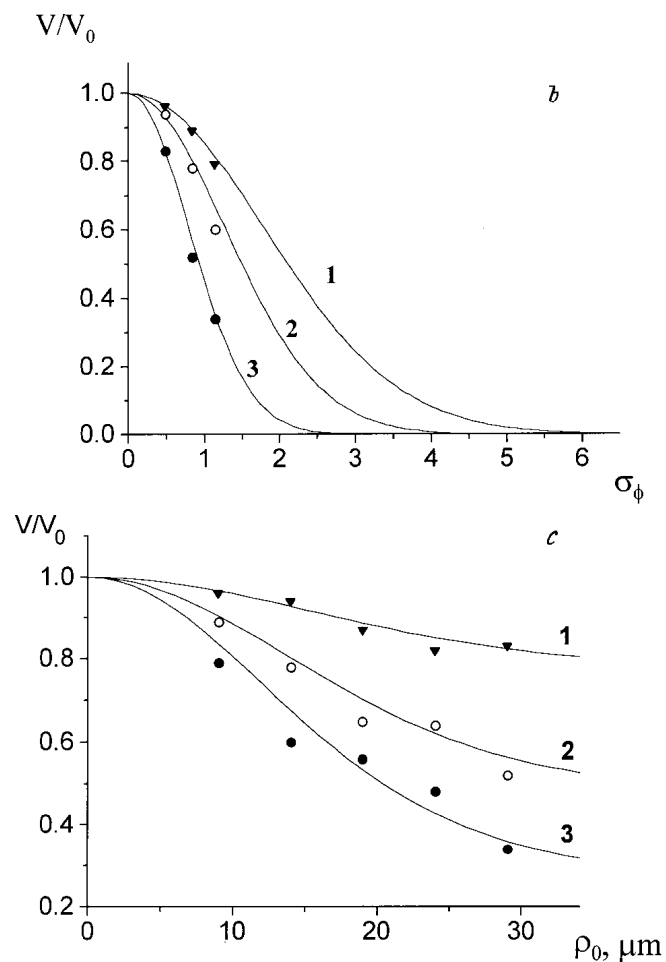


Рис. 2 (продолжение).

форму, $K_\phi(\rho_0) = \exp(-\rho_0^2/l_\phi^2)$. Там же приведены экспериментальные данные, полученные на образцах СФЭ (отбеленные спеклограммы) с предварительно установленными по методу [5] статистическими параметрами σ_ϕ и l_ϕ .

Промежуточный диапазон изменения l_ϕ соответствует третьему режиму — режиму дифракции на малом числе неоднородностей экрана, который имеет особые статистические свойства образующихся частично развитых спекл-полей [6]. Кривая изменения контраста полос $V(l_\phi)$ во всем диапазоне значений l_ϕ должна иметь гладкий характер с минимумом в этом третьем режиме. Аналитическое выражение такой зависимости должно включать в качестве параметров обе характеристики освещающего пучка w_0 и ρ_0 .

Увеличение σ_ϕ в обоих режимах сопровождается уменьшением контраста полос (рис. 2, *b* и рис. 3, *a* [2]), но это уменьшение подчиняется различным закономерностям.

Важной особенностью режима дефлекции является зависимость контраста полос средней интенсивности от периода полос Λ_0 в освещающем пучке, поскольку его величина определяет расстояние ρ_0 между перетяжками пучков на поверхности экрана. Поэтому контролируемое изменение периода Λ_0 , а следовательно и ρ_0 , позволяет с помощью соотношения (3) реализовать процедуру определения статистических параметров экрана по измеренной зависимости относительного контраста полос $V(\rho_0)/V_0$. На рис. 2, *c* приведены теоретические графики этой зависимости и экспериментальные данные, полученные для тех же образцов, что и данные на рис. 2, *a, b*.

Работа выполнена при частичном финансировании по гранту РФФИ № 96–15–96389, программа ”Государственная поддержка ведущих научных школ Российской Федерации”.

Список литературы

- [1] Рябухо В.П., Чаусский А.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 16. С. 57–62.
- [2] Рябухо В.П., Чаусский А.А. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 19. С. 47–53.
- [3] Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский Б.И. Введение в статическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
- [4] Гудмен Дж. Статистическая оптика. / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 528 с.
- [5] Рябухо В.П., Аветисян Ю.А., Суманова А.Б. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79. В. 2. С. 299–306.
- [6] Jakeman E. // Optical Engineering. 1984. V. 23. N 4. P. 453–461.