

“МИКРОЛИНЗОВЫЙ” ЭФФЕКТ ПРИ ДИФРАКЦИИ СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКОВ НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ФАЗОВЫХ ЭКРАНАХ

Д.А.Зимняков, В.П.Рябухо, К.В.Ларин

Взаимодействие когерентных пучков с рассеивающими объектами с дисперсией фазы неоднородностей $\sigma_\varphi^2 > 1$ в условиях, когда характерный размер неоднородностей сравним с размерами освещаемого участка и существенно превышает длину волны света, приводит к формированию в дальней зоне частично развитых спекл-структур с негауссовой статистикой комплексной амплитуды [1]. Отклонения функции плотности вероятности значений амплитуды подобных спекл-полей от предписываемого классической моделью развитого спекл-поля нормального закона [2] проявляются, в частности, в превышении значений контраста в зоне дифракции Фраунгофера над единичным значением. Теоретические исследования свойств поля, рассеянного случайным фазовым экраном (СФЭ) с $\sigma_\varphi^2 > 1$, в ближней зоне дифракции, проведенные в радиофизике [3,4], показали немонотонное поведение индекса мерцаний поля β с ростом расстояния от экрана до точки наблюдения. Положение максимума β в пространстве за СФЭ определяется фокусирующими свойствами крупномасштабных фазовых неоднородностей и оценивается соотношением: $z_m = \pi l_\varphi^2 (2\lambda\sigma_\varphi)^{-1}$, где l_φ — длина корреляции фазовых неоднородностей СФЭ.

В работе [5] проведены экспериментальные исследования зависимости индекса мерцаний от положения зоны регистрации для крупношероховатых СФЭ при их освещении широким коллимированным лазерным пучком и наблюдении в ближней зоне дифракции. При возрастании расстояния от экрана до зоны регистрации индекс мерцаний сначала достигает максимальной величины, а затем асимптотически стремится к 1 в зоне Фраунгофера.

Нами установлено, что при дифракции сфокусированного лазерного пучка на крупномасштабных СФЭ наблюдается иная картина, обусловленная конечными значениями кривизны волнового фронта освещающего пучка. Процесс

формирования рассеянного поля в этом случае контролируется:

— соотношением между радиусом кривизны волнового фронта зондирующего пучка на СФЭ и структурным параметром СФЭ $l_\varphi^2/\lambda\sigma_\varphi$;

— соотношением между диаметром перетяжки пучка D и l_φ .

В рамках приближений оптики гомоцентрических пучков параметр $2\pi ml_\varphi^2(\lambda\sigma_\varphi)^{-1}$ (m — коэффициент, определяемый формой неоднородностей) может быть интерпретирован как фокусное расстояние “микролинз” \bar{f} , моделирующих микро-неоднородности; отношение D/l_φ будет определять число “микролинз” в освещаемом участке. Максимальное нормированное среднеквадратичное значение флуктуаций интенсивности (контраста) в дальней зоне будет достигаться, если расстояние между СФЭ и плоскостью перетяжки пучка равно наиболее вероятному значению \bar{f} .

В работе исследованы зависимости нормированных значений статистических моментов второго и третьего порядков интенсивности спекл-поля (контраста и коэффициента асимметрии) в дальней зоне в зависимости от расстояния между перетяжкой пучка и СФЭ при дифракции сфокусированного лазерного пучка на крупномасштабных СФЭ. В качестве образцов СФЭ использовались отбеленные спеклограммы, зарегистрированные на голографических фотопластинках. Значения σ_φ и l_φ , определенные для исследуемых образцов с использованием корреляционного метода с пространственно модулированным лазерным пучком [6], находились в пределах от 0.5 до 2 и от 5 до 15 мкм соответственно. Регистрация флуктуаций интенсивности осуществлялась в параксиальной области дальней зоны дифракции при поперечном сканировании образца. Значения контраста и коэффициента асимметрии вычислялись как $V = \langle (I - \langle I \rangle)^{0.5} \rangle / \langle I \rangle$ и $Q_a = \langle (I - \langle I \rangle)^3 \rangle / (\langle I - \langle I \rangle \rangle^2)^{1.5}$. Для формирования сфокусированного зондирующего пучка с малой числовой апертурой $NA \simeq 0.1 - 0.2$ использовался микрообъектив $3.7\times$, что обеспечивало значение $D \simeq 8$ мкм и соответственно выполнение условия ($D/l_\varphi \simeq 1$). Расстояние z между образцом и фотодетектором было выбрано таким образом, чтобы обеспечить условие дифракции Фраунгофера в зоне регистрации: $z \gg 2\pi ml_\varphi^2(\lambda\sigma_\varphi)^{-1}$ [5].

На рис. 1,а приведены характерные зависимости контраста и коэффициента асимметрии от значения параметра дефокусировки Δz , полученные в эксперименте с образцами спеклограмм. Минимальные значения V и Q_a соответству-

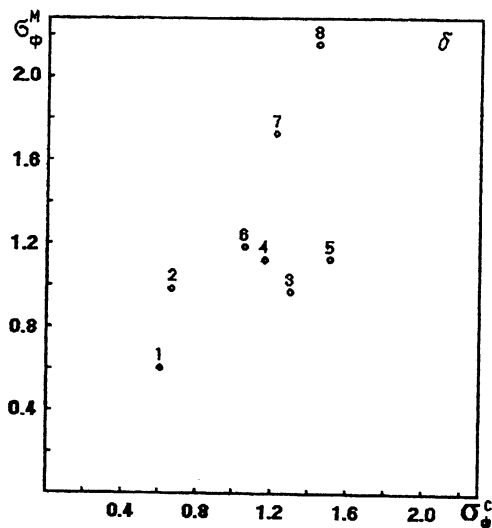
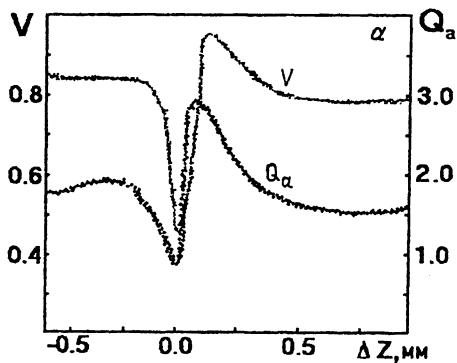


Рис. 1.

a — зависимости контраста (V) и коэффициента асимметрии (Q_a) распределений интенсивности спекл-поля в зоне Фраунгофера от параметра дефокусировки Δz . Образец — отбеленная спеклограмма, $\sigma_\varphi = 1.08$, $l_\varphi = 7.8$ мкм.

b — корреляция между значениями σ_φ , полученными с использованием различных методов: σ_φ^M — по положению максимумов на зависимостях $V(\Delta z)$, $Q_a(\Delta z)$; σ_φ^C — с использованием методики [6]. Образцы — спеклограммы с длинами корреляции l_φ : 1 \approx 6.4, 2 \approx 10.7, 3 \approx 7.1, 4 \approx 5.4, 5 \approx 5.4, 6 \approx 7.8, 7 \approx 7.0, 8 \approx 5.8 мкм.

ют положению образца в плоскости перетяжки пучка. Максимальные значения V и Q_a наблюдаются для значения параметра $\Delta z \approx 70$ мкм, равного значению фокусного расстояния "микролинз".

Положение Δz^m максимумов контраста и коэффициента асимметрии на зависимостях $V(\Delta z)$ и $Q_a(\Delta z)$ может быть использовано для оценки значений σ_φ и l_φ (анало-

гично [5]). На рис. 1,б приведены результаты сопоставления значений σ_φ , полученных различными методами, для исследованных в работе образцов спеклограмм. Значения $\sigma_\varphi^M = \pi l_\varphi^2 (2\lambda\sigma_\varphi)^{-1}$ оценивались исходя из положения максимумов Δz^m на зависимостях $V(\Delta z)$ и $Q_a(\Delta z)$ (параметр m выбран равным 0,25, что соответствует гипотетическому случаю рельефа СФЭ с преобладанием микронеоднородностей сферической формы), l_φ предполагалась равной длине корреляции фазовых неоднородностей СФЭ, определенной в соответствии с методикой [6]. Значения σ_φ^C также получены с использованием корреляционного метода [6].

Необходимо отметить значительную асимметрию зависимостей $V(\Delta z)$ и $Q_a(\Delta z)$ в области изменений Δz , где радиус кривизны волнового фронта пучка уменьшается и достигает минимального значения с увеличением $|\Delta z|$ (рис. 1,а). Данный эффект наблюдается для большинства исследованных образцов и проявляется в существовании резко выраженных пиков V и Q_a для положительных Δz и их отсутствии (или гораздо более слабой выраженности) для $\Delta z < 0$. Подобное поведение может быть интерпретировано как следствие особенностей рельефа поверхности СФЭ, связанных с процессом получения образцов и проявляющихся в существенном преобладании крупномасштабных неоднородностей ($L_\varphi \simeq D$) с отрицательной кривизной — “собирающих микролинз”. Топологически связанные участки поверхности СФЭ, расположенные между ними, характеризуются кривизной с обратным знаком; подобная структура может быть интерпретирована как нерегулярная сетка цилиндрических микролинз (для случая, иллюстрируемого рис. 1,а — “рассеивающих”). В результате дифракции пучка на подобной двумерной сетке неоднородностей при выполнении условия переотображения распределения интенсивности в плоскости перетяжки в зону регистрации в ней формируются специфические спекл-структуры, характеризующиеся достаточно высокой степенью пространственной организации.

Эффект повышения степени пространственной организации спекл-структур при изменении знака Δz для СФЭ с преобладанием рассеивателей одного типа иллюстрируется рис. 2, где приведены фрагменты бинарных изображений спекл-полей для СФЭ с зависимостями $V(\Delta z)$ и $Q_a(\Delta z)$, аналогичными рис. 1,а. Отсутствие пиков V на участке кривой, соответствующем $\Delta z < 0$, может быть объяснено меньшими флуктуациями интенсивности в спекл-структурах с более высокой степенью пространственной организации (для рассеивающей структуры, состоящей из ансамбля тополо-



Рис. 2. Фрагменты бинарных изображений спекл-структур при различных положениях образца относительно плоскости перетяжки освещающего пучка.

a — $\Delta z < 0$; *б* — $\Delta z > 0$. Образец — спеклограмма, $\sigma_\varphi = 1.23$, $l_\varphi = 7.0$ мкм.

гически связанных “одномерных” объектов — цилиндрических микролинз — величина флуктуаций интенсивности спеклов будет существенно ниже, чем в случае формирования спекл-структуры системой “нульмерных” рассеивателей — изолированных друг от друга неоднородностей).

Таким образом, в отличие от метода диагностики рассеивателей, основанного на анализе поведения характеристик рассеянного поля в ближней зоне при освещении объекта широким коллимированным зондирующим пучком [5], предлагаемый метод, основанный на использовании сфокусированных пучков и исследовании параметров поля в зоне Фраунгофера, позволяет не только проводить оценки параметров структуры σ_φ и l_φ , но и осуществлять идентификацию топологических особенностей образцов.

Список литературы

- [1] *Jakeman E.* // *Opt. Eng.* 1984. V. 23. N 4. P. 453–461.
- [2] *Dainty J.C.* In: *Progress in Optics*. V. 14. North-Holland, Amsterdam, 1979. P. 3–49.
- [3] *Альбер Я.И., Ерухимов Л.М., Рыжов В.А. и др.* // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1968. Т. 11. В. 8. С. 1371–1376.

- [4] Шишов В.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. В. 1. С. 85–92.
- [5] Ангельский О.В., Магун И.И., Максимяк П.П. и др. // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 71. В. 6. С. 1021–1026.
- [6] Рябухо В.П., Зимняков Д.А., Голубенцева Л.И. и др. В сб.: Оптические поля и оптические методы обработки информации. М., 1992. С. 29–37.

Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию
10 апреля 1994 г.

