

В.Г. Гусев

Формирование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет поверхности. Ч. I

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 15.10.2006 г.

Анализируется чувствительность спекл-интерферометра к поперечным или продольным перемещениям диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, когда на стадии записи двухэкспозиционной спеклограммы используется отрицательная линза. Показано, что чувствительность интерферометра к поперечному перемещению зависит от радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, освещающего поверхность. Чувствительность интерферометра к продольному перемещению зависит от масштаба Фурье-образа функции, характеризующей комплексную амплитуду отражения или пропускания рассеивателя. Экспериментальные результаты соответствуют теоретическим предположениям.

При выполнении двухэкспозиционной записи с использованием отрицательной линзы квази-Фурье- и Фурье-голограммы для контроля поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности в [1] показано, что механизм образования в дифрагирующих полях интерференционных картин обусловлен как однородным смещением в плоскости голограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, так и их наклонам. Это обстоятельство приводит на стадии восстановления записи к локализации интерференционных картин в двух плоскостях и для метрологического обеспечения – к необходимости выполнения пространственной фильтрации дифракционного поля.

В случае контроля продольного перемещения рассеивателя в плоскости голограммы имеет место, с одной стороны, неоднородное смещение субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции из-за разницы в масштабах Фурье-образов в плоскости голограммы комплексных амплитуд пропускания (или отражения) диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. С другой стороны, наличие изменяющихся по радиусу от оптической оси углов наклона субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции обуславливает локализацию интерференционных картин в двух плоскостях. Это приводит к необходимости выполнения пространственной фильтрации дифракционного поля на стадии восстановления голограммы для образования интерференционной картины идентичными спеклами двух экспозиций. В связи с вышеуказанным возникает необходимость выявить особенности корреляции распределений интенсив-

ности света, рассеянного поверхностью в начальном и перемещенном положениях рассеивателя, на основе полученных в [1] распределений комплексных амплитуд полей в плоскости фотопластины.

В настоящей статье анализируется образование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, с целью определения чувствительности спекл-интерферометра, когда на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы используется отрицательная линза.

Как представлено на рис. 1, матовый экран 1, находящийся в плоскости (x_1, y_1) , освещается когерентным излучением с расходящимся волновым фронтом радиусом кривизны R .

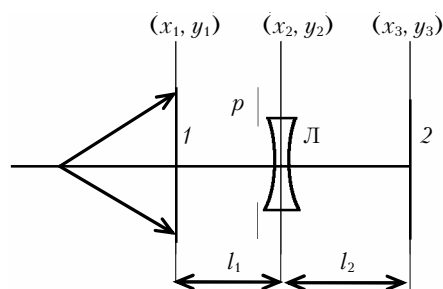


Рис. 1. Схема двухэкспозиционной записи спеклограммы: 1 – матовый экран; 2 – фотопластинка-спеклограмма; Л – отрицательная линза; p – апертурная диафрагма

Диффузно рассеянное им излучение после прохождения тонкой отрицательной линзы Л с фокусным расстоянием f регистрируется на фотопластинке 2, находящейся в плоскости (x_3, y_3) за время первой экспозиции. Перед повторным экспонированием осуществляется перемещение матового

экрана в плоскости его расположения, например в направлении оси x на величину a .

На основании [1] в плоскости (x_3, y_3) фотопластины распределения комплексных амплитуд полей, соответствующих первой и второй экспозициям, имеют вид

$$u_1(x_3, y_3) \sim \exp\left[\frac{ik}{2r}(x_3^2 + y_3^2)\right] \times \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_0^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes P(x_3, y_3) \right\}, \quad (1)$$

$$u_2(x_3, y_3) \sim \exp\left[\frac{ik}{2r}(x_3^2 + y_3^2)\right] \exp\left(-\frac{ika^2}{2l}\right) \exp\left(\frac{ikL_0ax_3}{l_1l_2}\right) \times \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_0^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikL_0ax_3}{l_1l_2}\right) P\left(x_3 + \frac{l_1l_2}{L_0}a, y_3\right) \right\}, \quad (2)$$

где \otimes – символ операции свертки; k – волновое число; r – радиус кривизны сферической волны; L_0 – геометрический параметр оптической системы, который удовлетворяет условию

$$1/L_0 = 1/l_1 + 1/f + 1/l_2, \quad l_1, l_2$$

– соответственно расстояние между плоскостями (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_2, y_2) ; (x_3, y_3) , (x_2, y_2) – главная плоскость отрицательной линзы L ;

$$1/l = 1/R + 1/l_1 - L_0/l_1^2$$

– введенное обозначение для сокращения записи; $F(x_3, y_3)$ – Фурье-образ комплексной амплитуды $t(x_1, y_1)$ пропускания матового экрана, являющейся случайной функцией координат, с пространственными частотами $L_0x_3/\lambda l_1l_2$, $L_0y_3/\lambda l_1l_2$, λ – длина волны когерентного источника света, используемого для записи и воспроизведения спеклограммы; $P(x_3, y_3)$ – Фурье-образ функции $p(x_2, y_2)$ зрачка [2] отрицательной линзы L с пространственными частотами $x_3/\lambda l_2$, $y_3/\lambda l_2$.

При условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы на линейном участке кривой почернения фотоматериала ее комплексная амплитуда пропускания на рис. 2 с учетом того, что постоянная составляющая пропускания будет занимать очень малую область пространства в плоскости регистрации 3 спекл-интерферограммы, определяется выражением

$$\tau(x_3, y_3) \sim \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_0^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes P(x_3, y_3) \right\} \times \left\{ k.c. \right\} + \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{iklL_0^2}{2l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikL_0ax_3}{l_1l_2}\right) P\left(x_3 + \frac{l_1l_2}{L_0}a, y_3\right) \right\} \left\{ k.c. \right\}, \quad (3)$$

где $k.c.$ – комплексно-сопряженная величина.

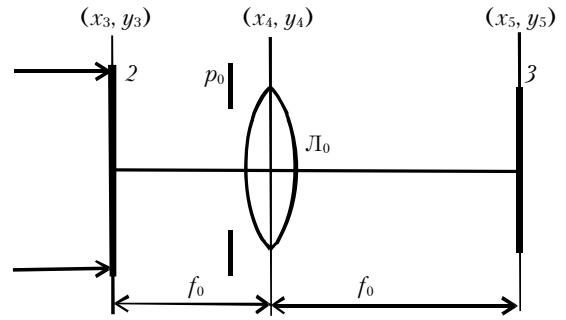


Рис. 2. Схема воспроизведения спеклограммы, характеризующей поперечное перемещение рассеивателя: 2 – спеклограмма; 3 – плоскость регистрации спекл-интерферограммы; L_0 – положительная линза; p_0 – апертурная диафрагма

Пусть на стадии воспроизведения записи дифрагирующее на спеклограмме поле ограничивается апертурной диафрагмой p_0 (см. рис. 2) тонкой положительной линзы L_0 с фокусным расстоянием f_0 . Тогда распределение комплексной амплитуды поля в плоскости (x_5, y_5) на основании [3] примет вид

$$u(x_5, y_5) \sim \iint_{-\infty}^{\infty} \tau(x_3, y_3) \exp\left[-\frac{ik}{f_0}(x_3x_5 + y_3y_5)\right] dx_3 dy_3 \otimes P_0(x_5, y_5), \quad (4)$$

где $P_0(x_5, y_5)$ – Фурье-образ функции $p_0(x_4, y_4)$ зрачка [2] линзы L_0 с пространственными частотами $x_5/\lambda f_0$, $y_5/\lambda f_0$; (x_4, y_4) – главная плоскость положительной линзы.

В результате подстановки (3) в (4) с учетом четности функции $p(x_2, y_2)$ получим

$$u(x_5, y_5) \sim \left\{ \left\{ p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t\left(-\frac{hl_2}{L_0f_0}x_5, -\frac{hl_2}{L_0f_0}y_5\right) \right\} \times \exp\left[\frac{ikl_1^2l_2^2}{2L_0^2f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t^*\left(\frac{hl_2}{L_0f_0}x_5, \frac{hl_2}{L_0f_0}y_5\right) \right\} \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2l_2^2}{2L_0^2f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] + \left\{ p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5 + \frac{L_0}{l_1}a, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) \times \exp\left[-\frac{hl_2}{L_0f_0}x_5, -\frac{hl_2}{L_0f_0}y_5\right] \exp\left[\frac{ikl_1^2l_2^2}{2L_0^2f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \right\} \times \exp\left(\frac{ikl_1l_2ax_5}{L_0f_0}\right) \otimes p\left(\frac{l_2}{f_0}x_5 - \frac{L_0}{l_1}a, \frac{l_2}{f_0}y_5\right) t^*\left(\frac{hl_2}{L_0f_0}x_5, \frac{hl_2}{L_0f_0}y_5\right) \right\} \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2l_2^2}{2L_0^2f_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{ikl_1l_2ax_5}{L_0f_0}\right) \left\{ k.c. \right\} \otimes P_0(x_5, y_5). \quad (5)$$

Из (5) следует, что в пределах области, определенной шириной функции

$$p(l_2x_5/f_0, l_2y_5/f_0) \otimes p(l_2x_5/f_0, l_2y_5/f_0),$$

в плоскости (x_5, y_5) имеет место субъективное спекл-поле с размером спекла, определяемого шириной функции $P_0(x_5, y_5)$.

Положим, что при расчете распределения освещенности

$$I(x_5, y_5) = u(x_5, y_5)u^*(x_5, y_5)$$

в плоскости регистрации \mathcal{Z} (см. рис. 2) для исключения из рассмотрения спекл-эффекта проводится усреднение по площадке, превышающей область существования субъективного спекла, но в пределах которой не происходит изменение фазы kl_2ax_5/LL_0f_0 . Кроме того, как это используется в литературе, например [4, 5], будем считать, что случайная функция дельта — коррелирована, т.е. с учетом однородности случайной величины

$$\begin{aligned} & \langle t[-l_2(x_5 - \xi)/L_0f_0, -l_2(y_5 - \eta)/L_0f_0] \times \\ & \times t^*[-l_2(x_5 - \xi')/L_0f_0, -l_2(y_5 - \eta')/L_0f_0] \times \\ & \times t^*(l_2\xi/L_0f_0, l_2\eta/L_0f_0)t(l_2\xi'/L_0f_0, l_2\eta'/L_0f_0) \rangle \sim \\ & \sim \delta(\xi - \xi')\delta(\eta - \eta'), \end{aligned}$$

где угловые скобки обозначают усреднение; $\delta(\xi - \xi')\delta(\eta - \eta')$ — дельта-функция Дирака. Тогда распределение освещенности в плоскости (x_5, y_5) принимает вид

$$I(x_5, y_5) \sim 1 + \nu \cos\left(\frac{kl_2ax_5}{LL_0f_0}\right), \quad (6)$$

где ν — видность интерференционной картины. Причем вещественная функция

$$\nu = p'(x_5, y_5) \otimes p'(x_5, y_5) / p(x_5, y_5) \otimes p(x_5, y_5),$$

где $p'(x_5, y_5)$ — функция, равная единице в пределах перекрытия областей $p(x_5, y_5)$, $p(x_5 + L_0f_0a/l_2, y_5)$ и равная нулю вне области перекрытия.

Согласно (6) на оси x в плоскости регистрации \mathcal{Z} (см. рис. 2) эквидистантно расположены интерференционные полосы, измерение периодов которых позволяет определить величину поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. При этом их период

$$\Delta x'_5 = \lambda f_0 / (1 + l_2/f + l_2/RL_0)a$$

для фиксированных величин $\lambda, f, f_0, l_1, l_2$ зависит от радиуса кривизны расходящейся сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения матового экрана 1 (см. рис. 1) на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы. Кроме того, чувствительность интерферометра увеличивается с уменьшением R , что объясняется увеличением однородного смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. В качестве примера зависимость

частоты интерференционных полос от радиуса кривизны представлена на рис. 3 для $\lambda = 0,6328$ мкм, $a = 25$ мкм, $f = 220$ мм, $f_0 = 50$ мм, $l_1 = 160$ мм, $l_2 = 160$ мм.

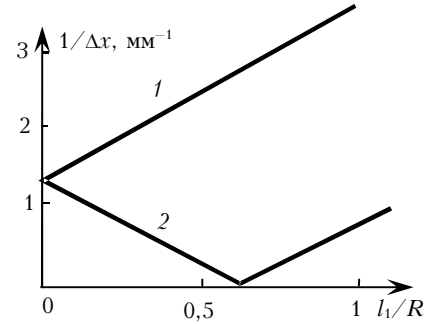


Рис. 3. Зависимости частоты интерференционных полос для фиксированных величин $\lambda, f, f_0, l_1, l_2$ от радиуса кривизны: 1 — расходящейся сферической волны, 2 — сходящейся

С изменением знака радиуса кривизны волнового фронта в плоскости (x_1, y_1) (см. рис. 1) период интерференционных полос

$$\Delta x''_5 = \lambda f_0 / (1 + l_2/f - l_2/RL_0)a$$

увеличивается, когда R уменьшается в интервале $l_1^2/(l_1 - L_0) \leq R \leq \infty$. При этом условие $R' = l_1^2/(l_1 - L_0)$ соответствует условию формирования в (1) распределения комплексной амплитуды поля соответствующей Фурье-образу функции $t(x_1, y_1)$ [6] и отсутствию смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции. Дальнейшее уменьшение величины R приводит к увеличению чувствительности интерферометра из-за возникновения и увеличения однородного смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов второй экспозиции.

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей поперечное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, имеет место ее смещение в плоскости (x_3, y_3) (см. рис. 2) на величину x_{03} . Тогда комплексная амплитуда пропуска спеклограммы определяется выражением

$$\begin{aligned} \tau(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \right. \\ & \otimes \exp\left\{ -\frac{ikLL_0^2}{2l_1^2l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes P(x_3, y_3) \left. \right\} \{k.c.\} + \\ & + \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \exp\left\{ -\frac{ikLL_0^2}{2l_1^2l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp\left[-\frac{ikL_0a}{l_2} (x_3 + x_{03}) \right] P\left(x_3 + \frac{l_2}{LL_0} a, y_3 \right) \right\} \{k.c.\}, \quad (7) \end{aligned}$$

а распределение комплексной амплитуды поля в плоскости (x_5, y_5) принимает вид

$$\begin{aligned}
u(x_5, y_5) \sim & \left\{ p \left(\frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t \left(-\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} x_5, -\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times \exp \left[\frac{i k l_1^2 l_2^2}{2 L_0^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \exp(i 2 k x_{03} x_5 / f_0) \otimes \\
& \otimes p \left(\frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left(\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[-\frac{i k l_1^2 l_2^2}{2 L_0^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \exp(i 2 k x_{03} x_5 / f_0) \Big\} + \\
& + \left\{ p \left(\frac{l_2}{f_0} x_5 + \frac{L_0 a}{l_1}, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t \left(-\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} x_5, -\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times \exp \left[\frac{i k l_1^2 l_2^2}{2 L_0^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \exp(i 2 k x_{03} x_5 / f_0) \times \\
& \times \exp(i k l_1 l_2 a x_5 / L_0 f_0) \otimes p \left(\frac{l_2}{f_0} x_5 - \frac{L_0}{l_1} a, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times t^* \left(\frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} x_5, \frac{l_1 l_2}{L_0 f_0} y_5 \right) \exp \left[-\frac{i k l_1^2 l_2^2}{2 L_0^2 f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \left. \left. \times \exp(i 2 k x_{03} / f_0) \exp(i k l_1 l_2 a x_5 / L_0 f_0) \right\} \right\} \otimes P_0(x_5, y_5). \quad (8)
\end{aligned}$$

Выполнение вышеприведенных расчетов для определения распределения освещенности в плоскости (x_5, y_5) приводит к выражению, соответствующему (6). Следовательно, в случае спекл-интерференционного контроля поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности наблюдаются «замороженные» интерференционные полосы и для их регистрации отсутствует необходимость в пространственной фильтрации дифракционного поля.

Из сравнения голографического интерферометра [1], в котором регистрируется интерференционная картина, локализуемая в Фурье-плоскости, и рассматриваемого спекл-интерферометра следует, что чувствительность их к поперечному перемещению рассеивателя одинакова. Это объясняется тем, что природа механизма образования интерференционных картин заключена в однородном смещении субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, в плоскости голограммы или спеклограммы. Причем в спекл-интерферометре независимо от радиуса кривизны сферического волнового фронта в плоскости (x_1, y_1) (см. рис. 1) видность интерференционных полос меньше единицы. Это объясняется тем, что в голографическом интерферометре в Фурье-плоскости формируются два изображения зрачка отрицательной линзы, в пределах перекрытия которых образуется интерференционная картина. В спекл-интерферометре же отсутствует формирование изображения зрачка отрицательной линзы в Фурье-плоскости, и из-за фонового светового излучения, обусловленного дифракцией от неперекрывающихся областей,

видность интерференционных полос меньше единицы. Однако для малой величины поперечного перемещения рассеивателя, когда величина $L_0 f_0 a / l_1 l_2$ много меньше радиуса зрачка отрицательной линзы, отличие от единицы незначительно. Кроме того, в спекл-интерферометре по сравнению с голографическим интерферометром [1] уменьшается порог чувствительности к поперечному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, что обусловлено увеличением пространственной протяженности интерференционной картины в спекл-интерферометрии [7].

Следует отметить, что выполнение косвенных исследований, например [8, 9], связанных с формированием голографических интерферограмм бокового сдвига, когда на стадии записи используется отрицательная линза, сопровождается образованием в нулевом порядке дифракции спекл-интерференционных картин. Причем они образуются, если учитывается вышеуказанная зависимость смещения в плоскости регистрирующей среды субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции от радиуса кривизны волнового фронта когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя.

Пусть перед повторным экспонированием фотопластины 2 (см. рис. 1) матовый экран 1 оказывается смещенным по оси z на величину $\Delta l \ll l_1$. Тогда на основании [1] распределение комплексной амплитуды поля, соответствующее второй экспозиции, в плоскости фотопластины определяется выражением

$$\begin{aligned}
u'_2(x_3, y_3) \sim & \exp(i k \Delta l) \exp \left[\frac{i k}{2 r} (x_3^2 + y_3^2) \right] \times \\
& \times \exp \left[-\frac{i k L_0^2 \Delta l}{2 l_1^2 l_2^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \left\{ F'(x_3, y_3) \otimes \right. \\
& \left. \otimes \exp \left[-\frac{i k l' L_0^2}{2 (l_1 + \Delta l)^2 l_2^2} (x_3^2 + y_3^2) \right] \otimes P(x_3, y_3) \right\}, \quad (9)
\end{aligned}$$

где $F'(x_3, y_3)$ – Фурье-образ функции $t(x_1, y_1)$ с пространственными частотами

$$\begin{aligned}
L'_0 x_3 / \lambda (l_1 + \Delta l) l_2, \quad L'_0 y_3 / \lambda (l_1 + \Delta l) l_2; \quad L'_0 = L_0 (1 + L_0 \Delta l / l_1^2); \\
1/l' = 1/(l_1 + \Delta l) + 1/(R - \Delta l) - L'_0 / (l_1 + \Delta l)^2.
\end{aligned}$$

Согласно (9) субъективные спеклы, соответствующие второй экспозиции, смещены по радиусу от оптической оси относительно идентичных спеклов первой экспозиции из-за разницы в масштабах Фурье-образов $F(x_3, y_3)$, $F'(x_3, y_3)$ в (1) и (9). Причем это неоднородное смещение спеклов не зависит от радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя. Также не зависит от радиуса кривизны и изменяющийся по радиусу от оптической оси угол наклона субъективных спеклов, определяемый

наличием в (9) множителя $\exp[-ikL_0^2\Delta l(x_3^2+y_3^2)/2l_1^2l_2^2]$. В свою очередь, ориентационный характер субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, таков, что имеет место дополнительное изменение по радиусу от оптической оси их угла наклона, которое зависит от радиуса кривизны волнового фронта в плоскости (x_1, y_1) (см. рис. 1) и определяется множителем в (9), стоящим под интегралом сверток функций. Это обстоятельство приводит в общем случае к значительной декорреляции спекл-структур двух экспозиций, которая будет отсутствовать при освещении рассеивателя когерентным излучением с расходящейся или сходящейся сферической волной радиусом кривизны $R' = l_1^2/(l_1 - L_0)$ [1]. Поэтому для доказательства возможности формирования высококонтрастной спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, ограничимся таким значением R' волнового фронта. Тогда распределение комплексной амплитуды пропускания $\tau'(x_3, y_3)$ двухэкспозиционной спеклограммы (рис. 4) без учета постоянной составляющей пропускания принимает вид

$$\begin{aligned} \tau'(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3, y_3) \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2}{4l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes \right. \\ & \left. \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\} + \left\{ F'(x_3, y_3) \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2}{4l_1^2l_2^2}(x_3^2 + y_3^2)\right] \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\}, \quad (10) \end{aligned}$$

где пространственные частоты Фурье-образа $F(x_3, y_3)$ соответствуют величинам

$$L_0x_3/\lambda l_1 b_2(1 + \Delta l/R'), \quad L_0y_3/\lambda l_1 b_2(1 + \Delta l/R').$$

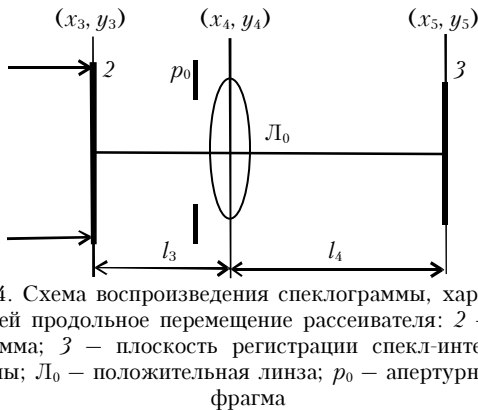


Рис. 4. Схема воспроизведения спеклограммы, характеризующей продольное перемещение рассеивателя: 2 — спеклограмма; 3 — плоскость регистрации спекл-интерферограммы; L_0 — положительная линза; p_0 — апертурная диафрагма

Положим, что на стадии воспроизведения спеклограммы рассеянное ею излучение регистрируется в плоскости (x_5, y_5) с использованием положительной тонкой линзы L_0 с фокусным расстоянием f_0 . Тогда распределение его комплексной ам-

плитуды в указанной плоскости в приближении Френеля определяется выражением

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \iint \iint_{-\infty}^{\infty} \tau'(x_3, y_3) \exp\left\{\frac{ik}{2l_3}[(x_3-x_4)^2 + (y_3-y_4)^2]\right\} \times \\ & \times p_0(x_4, y_4) \exp\left[-\frac{ik}{2f_0}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \\ & \times \exp\left\{\frac{ik}{2l_4}[(x_4-x_5)^2 + (y_4-y_5)^2]\right\} dx_3 dy_3 dx_4 dy_4, \quad (11) \end{aligned}$$

где (x_4, y_4) — главная плоскость линзы L_0 ; l_3, l_4 — соответственно расстояние между плоскостями $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$ и $(x_4, y_4), (x_5, y_5)$.

В результате выполнения известных в Фурье-оптике преобразований получим

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \\ & \times \left\{ \tau'\left(-\frac{l_3}{l_4}x_5, -\frac{l_3}{l_4}y_5\right) \exp\left[\frac{ikl_3}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \\ & \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'_0(x_5, y_5) \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $\mu = (\bar{l} + l_3)/l_4$ — коэффициент масштабного преобразования, который следует из условия

$$1/f_0 = 1/(\bar{l} + l_3) + 1/l_4; P'_0(x_5, y_5)$$

— Фурье-образ функции $p_0(x_4, y_4)$ зрачка линзы L_0 с пространственными частотами $x_5/\lambda l_4, y_5/\lambda l_4$.

Согласно (12) в плоскости регистрации 3 (см. рис. 4) образуется субъективное спекл-поле с размером спекла, определяемого шириной функции $P'_0(x_5, y_5)$, на которое наложено распределение фазы расходящейся сферической волны радиусом кривизны l_4 .

При подстановке (10) в (12) распределение комплексной амплитуды поля в плоскости (x_5, y_5) принимает вид

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[\frac{ikl_3}{2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \right. \\ & \times \left\{ \left\{ F\left(-\frac{l_3}{l_4}x_5, -\frac{l_3}{l_4}y_5\right) \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \right. \\ & \left. \left. \otimes P\left(-\frac{l_3}{l_4}x_5, -\frac{l_3}{l_4}y_5\right) \right\} \{k.c.\} + \left\{ F'\left(-\frac{l_3}{l_4}x_5, -\frac{l_3}{l_4}y_5\right) \otimes \right. \right. \\ & \left. \left. \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2l_3^2}{4l_1^2l_2^2l_4^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P\left(-\frac{l_3}{l_4}x_5, -\frac{l_3}{l_4}y_5\right) \right\} \{k.c.\} \right\} \otimes \\ & \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'_0(x_5, y_5) \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

В результате интегрального представления в (13) операции свертки с функцией

$$\exp[-ik\mu l_3(x_5^2 + y_5^2)/2\tilde{l}l_4]$$

получим

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \right. \\ & \times \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \left\{ p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) \times \right. \right. \\ & \times t\left(-\frac{l_1l_2\mu}{\tilde{l}l_0}x_5, -\frac{l_1l_2\mu}{\tilde{l}l_0}y_5\right) \exp\left[\frac{ikl_1^2l_2^2\mu^2}{\tilde{l}^2R'l_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \\ & \otimes p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) t^*\left(\frac{l_1l_2\mu}{\tilde{l}l_0}x_5, \frac{l_1l_2\mu}{\tilde{l}l_0}y_5\right) \times \\ & \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2l_2^2\mu^2}{\tilde{l}^2R'l_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] + p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) \times \\ & \times t\left[-\frac{l_1l_2}{\tilde{l}l_0}\mu\left(1 + \frac{\Delta l}{R'}\right)x_5, -\frac{l_1l_2}{\tilde{l}l_0}\mu\left(1 + \frac{\Delta l}{R'}\right)y_5\right] \times \\ & \times \exp\left[\frac{ikl_1^2l_2^2\mu^2}{\tilde{l}^2R'l_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes p\left(\frac{l_2}{\tilde{l}}\mu x_5, \frac{l_2}{\tilde{l}}\mu y_5\right) \times \\ & \times t^*\left[\frac{l_1l_2}{\tilde{l}l_0}\mu\left(1 + \frac{\Delta l}{R'}\right)x_5, \frac{l_1l_2}{\tilde{l}l_0}\mu\left(1 + \frac{\Delta l}{R'}\right)y_5\right] \times \\ & \left. \left. \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2l_2^2\mu^2}{\tilde{l}^2R'l_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \right\} \otimes P'_0(x_5, y_5) \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

Для $\Delta l \ll R'$

$$\begin{aligned} t\left[-l_1l_2\mu(1+\Delta l/R')x_5/\tilde{l}l_0, -l_1l_2\mu(1+\Delta l/R')y_5/\tilde{l}l_0\right] = \\ = t\left(-l_1l_2\mu x_5/\tilde{l}l_0, -l_1l_2\mu y_5/\tilde{l}l_0\right) \otimes \exp\left[\frac{-ikl_1^2l_2^2\mu^2(x_5^2 + y_5^2)}{2\tilde{l}^2l_0^2\Delta l}\right], \end{aligned}$$

а с учетом того, что $\tau'(x_3, y_3)$ — действительно функция:

$$\begin{aligned} t^*\left[l_1l_2\mu(1 + \Delta l/R')x_5/\tilde{l}l_0, l_1l_2\mu(1 + \Delta l/R')y_5/\tilde{l}l_0\right] = \\ = t^*\left(l_1l_2\mu x_5/\tilde{l}l_0, l_1l_2\mu y_5/\tilde{l}l_0\right) \otimes \exp\left[\frac{-ikl_1^2l_2^2\mu^2(x_5^2 + y_5^2)}{2\tilde{l}^2l_0^2\Delta l}\right]. \end{aligned}$$

Тогда в результате интегрального представления в (14) операции свертки с функцией

$$\exp[ik\mu^2(x_5^2 + y_5^2)/2\tilde{l}]$$

распределение комплексной амплитуды поля в плоскости (x_5, y_5) принимает вид

$$\begin{aligned} u'(x_5, y_5) \sim & \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \right. \\ & \times \exp\left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \\ & \otimes \left\{ \left\{ F_1(x_5, y_5) \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \times \right. \\ & \times \left\{ F_2(x_5, y_5) \otimes \exp\left[\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \right\} + \\ & + \left\{ \exp\left[\frac{ikL_0^2\mu^2\Delta l}{2l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_1(x_5, y_5) \otimes \right. \\ & \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \times \\ & \times \left\{ \exp\left[\frac{ikL_0^2\mu^2\Delta l}{2l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] F_2(x_5, y_5) \otimes \right. \\ & \left. \left. \left. \otimes \exp\left[\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2l_2^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes P'(x_5, y_5) \right\} \right\} \right\} P'_0(x_5, y_5), \quad (15) \end{aligned}$$

где $F_1(x_5, y_5)$, $F_2(x_5, y_5)$ — Фурье-образы соответственно функций

$$t\left(-l_1l_2\mu\xi/\tilde{l}l_0, -l_1l_2\mu\eta/\tilde{l}l_0\right), \quad t^*\left(l_1l_2\mu\xi/\tilde{l}l_0, l_1l_2\mu\eta/\tilde{l}l_0\right)$$

с пространственными частотами $\mu^2x_5/\lambda\tilde{l}$, $\mu^2y_5/\lambda\tilde{l}$; $P'(x_5, y_5)$ — Фурье-образ функции $p(l_2\mu\xi/\tilde{l}, l_2\mu\eta/\tilde{l})$ с пространственными частотами $\mu^2x_5/\lambda\tilde{l}$, $\mu^2y_5/\lambda\tilde{l}$.

Так как

$$kL_0^2\mu^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/l_1^2l_2^2 \ll k\mu^2(x_5^2 + y_5^2)/2\tilde{l},$$

то в силу медленности изменения с координатой функции $\exp[ikL_0^2\mu^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/l_1^2l_2^2]$ вынесем ее в (15) из-под знаков интегралов свертки с функциями

$$\begin{aligned} \exp\left[ikR'L_0^2\mu^2(x_5^2 + y_5^2)/4l_1^2l_2^2\right], \quad P'(x_5, y_5), \\ \exp[-ik\mu^2(x_5^2 + y_5^2)/2\tilde{l}]. \end{aligned}$$

Кроме того, положим, что размер субъективного спекла в плоскости регистрации \mathcal{Z} (см. рис. 4) хотя бы на порядок [10] меньше периода изменения функции $1 + \exp[ikL_0^2\mu^2\Delta l(x_5^2 + y_5^2)/l_1^2l_2^2]$. Тогда с учетом интегрального представления операции свертки в (15) распределение освещенности в плоскости (x_5, y_5) определяется выражением

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos \left[\frac{kL_0^2 \mu^2 \Delta l}{l_1^2 l_2^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \times \\
& \times \left| \exp \left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}l_4} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \left\{ \exp \left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \otimes \\
& \otimes p \left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}} x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}} y_5 \right) t \left(-\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu x_5, -\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[\frac{ikl_1^2 l_2^2 \mu^2}{\tilde{l}^2 R' L_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \otimes p \left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}} x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}} y_5 \right) \times \\
& \times t^* \left(\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu x_5, \frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu y_5 \right) \exp \left[-\frac{ikl_1^2 l_2^2 \mu^2}{\tilde{l}^2 R' L_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \left\} \otimes \right. \\
& \left. \otimes P_0'(x_5, y_5) \right|^2. \quad (16)
\end{aligned}$$

Если на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы матовый экран l (см. рис. 1) освещается когерентным излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны $R' = l_1^2/(l_1 - L_0)$, то распределение освещенности в плоскости (x_5, y_5) подобно выражению (16), т.е.

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos \left[\frac{kL_0^2 \mu^2 \Delta l}{l_1^2 l_2^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \times \\
& \times \left| \exp \left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}l_4} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \times \left\{ \exp \left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}} (x_5^2 + y_5^2) \right] \right\} \otimes \\
& \otimes p \left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}} x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}} y_5 \right) t \left(-\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu x_5, -\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu y_5 \right) \otimes \\
& \otimes p \left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}} x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}} y_5 \right) \times t^* \left(\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu x_5, \frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0} \mu y_5 \right) \left\} \otimes P_0'(x_5, y_5) \right|^2, \quad (17)
\end{aligned}$$

в котором отличие заключается только в другом распределении освещенности в субъективной спекл-структуре.

Из (16), (17) следует, что в плоскости (x_5, y_5) в пределах области, определяемой шириной функции

$$p(l_2\mu x_5/\tilde{l}, l_2\mu y_5/\tilde{l}) \otimes p(l_2\mu x_5/\tilde{l}, l_2\mu y_5/\tilde{l}),$$

субъективная спекл-структура промодулирована полосами равного наклона — системой концентрических интерференционных колец, измерение радиусов которых в соседних порядках интерференции обеспечивает возможность определения продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности для известных величин λ , μ , L_0 , l_1 , l_2 . Кроме того, чувствительность спекл-интерферометра к продольному перемещению рассеивателя зависит от величины $L_0/l_1 l_2$, определяющей в плоскости спеклограммы масштаб Фурье-образа функции, характеризующей комплексную амплитуду пропускания матового экрана l (см. рис. 1), находящегося в плоскости (x_1, y_1) . Причем чувствительность увеличивается с уменьшением масштаба Фурье-образа $F(x_3, y_3)$, так как это об-

стоятельство приводит к увеличению неоднородного (изменяющегося по радиусу от оптической оси) смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции.

Коэффициент масштабного преобразования μ в (16), (17) связан со стадией воспроизведения спеклограммы, и он не определяет чувствительность спекл-интерферометра к продольному перемещению рассеивателя. Это вытекает из следующего. Из вышеприведенных условий, т.е.

$$\Delta l \ll R' \text{ и } kL_0^2 \mu^2 \Delta l (x_5^2 + y_5^2) / l_1^2 l_2^2 \ll k\mu^2 (x_5^2 + y_5^2) / 2\tilde{l},$$

получаем $\tilde{l} = l_1^2 l_2^2 / 2L_0^2 R'$. Тогда оптимальная величина $l_3 = \tilde{l}$, так как для $l_3 < \tilde{l}$ распределение комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации спекл-интерферограммы становится ближе к распределению, соответствующему распределению поля в дальней зоне дифракции, в которой отсутствует совпадение идентичных спеклов двух экспозиций как необходимое условие для формирования в диффузно рассеянных полях интерференционной картины. В свою очередь, для $l_3 < \tilde{l}$ распределение комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации спекл-интерферограммы становится ближе к распределению, соответствующему распределению поля в плоскости формирования изображения спеклограммы, в которой также отсутствует совпадение идентичных спеклов двух экспозиций. Следовательно, при $l_3 = \tilde{l}$ имеет место максимальная контрастность спекл-интерференционной картины, и использование на стадии воспроизведения спеклограмм положительных линз L_0 (см. рис. 4) с разными величинами фокусных расстояний f_0 приводит к разным значениям коэффициентов μ . Но при этом остается неизменным произведение квадрата коэффициента μ и разницы квадратов радиусов колец в соседних порядках интерференции.

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, имеет место ее смещение в плоскости (x_3, y_3) (см. рис. 4), например в направлении оси x на величину x_{03} . Тогда комплексная амплитуда пропускания спеклограммы определяется выражением

$$\begin{aligned}
\tau'(x_3, y_3) \sim & \left\{ F(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \right. \\
& \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_0^2}{4l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes P(x_3, y_3) \left. \right\} \{k.c.\} + \\
& + \left\{ F'(x_3 + x_{03}, y_3) \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR'L_0^2}{4l_1^2 l_2^2} [(x_3 + x_{03})^2 + y_3^2] \right\} \otimes \right. \\
& \left. \otimes P(x_3, y_3) \right\} \{k.c.\}. \quad (18)
\end{aligned}$$

В этом случае, следуя вышеприведенному анализу формирования спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение рассеивателя, получим распределение комплексной амплитуды поля в плоскости (x_5, y_5) в виде

$$\begin{aligned}
u'(x_5, y_5) \sim & \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \right. \\
& \times \exp\left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \\
& \otimes \left\{ F_1\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}, y_5\right) \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \otimes \right. \\
& \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \left\{ F_2\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}, y_5\right) \otimes \right. \\
& \otimes \exp\left[\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} + \\
& + \left\{ \exp\left[\frac{ikL_0^2\mu^2\Delta l}{2l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] F_1\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}, y_5\right) \otimes \right. \\
& \otimes \exp\left[-\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \times \\
& \times \left\{ \exp\left[\frac{ikL_0^2\mu^2\Delta l}{2l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \times \right. \\
& \times F_2\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}, y_5\right) \otimes \exp\left[\frac{ikR'L_0^2\mu^2}{4l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \otimes \\
& \otimes P'(x_5, y_5) \left. \right\} \left. \right\} \otimes P'_0(x_5, y_5) \left. \right\}, \quad (19)
\end{aligned}$$

на основании которого с учетом выполнения интегрального представления операции свертки с функцией $\exp[-ik\mu^2(x_5^2 + y_5^2)/2\tilde{l}]$ распределение освещенности в указанной плоскости принимает вид

$$\begin{aligned}
I'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos\left[\frac{kL_0^2\mu^2\Delta l}{l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \right\} \times \\
& \times \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \right. \\
& \otimes p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) t\left(-\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu x_5, -\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu y_5\right) \times \\
& \times \exp\left[\frac{ikl_1^2 l_2^2 \mu^2}{\tilde{l}^2 R' L_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{i2k\mu}{\tilde{l}}x_{03}x_5\right) \otimes \\
& \otimes p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) t^*\left(\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu x_5, \frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu y_5\right) \times \\
& \times \exp\left[-\frac{ikl_1^2 l_2^2 \mu^2}{\tilde{l}^2 R' L_0^2}(x_5^2 + y_5^2)\right] \exp\left(\frac{i2k\mu}{\tilde{l}}x_{03}x_5\right) \left. \right\} \otimes P'_0(x_5, y_5) \left. \right\}^2. \quad (20)
\end{aligned}$$

Если на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы матовый экран 1 (см. рис. 1) освещается когерентным излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны $R' = l_1^2/(l_1 - L_0)$, то распределение освещенности в плоскости (x_5, y_5) подобно выражению (20), т.е.

$$\begin{aligned}
u'(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos\left[\frac{kL_0^2\mu^2\Delta l}{l_1^2 l_2^2} \left[\left(x_5 - \frac{x_{03}}{\mu}\right)^2 + y_5^2\right]\right] \right\} \times \\
& \times \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu l_3}{2\tilde{l}_4}(x_5^2 + y_5^2)\right] \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu^2}{2\tilde{l}}(x_5^2 + y_5^2)\right] \otimes \right. \right. \\
& \otimes p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) t\left(-\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu x_5, -\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu y_5\right) \exp\left(\frac{ik\mu}{\tilde{l}}x_{03}x_5\right) \otimes \\
& \otimes p\left(\frac{l_2\mu}{\tilde{l}}x_5, \frac{l_2\mu}{\tilde{l}}y_5\right) t^*\left(\frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu x_5, \frac{l_1 l_2}{\tilde{l}L_0}\mu y_5\right) \exp\left(\frac{ik\mu}{\tilde{l}}x_{03}x_5\right) \left. \right\} \otimes \\
& \otimes P'_0(x_5, y_5) \left. \right\}^2. \quad (21)
\end{aligned}$$

Согласно (20), (21) на стадии воспроизведения спеклограммы в случае смещения ее в плоскости расположения имеет место перемещение интерференционных полос («живые» спекл-интерференционные полосы) в направлении, противоположном направлению смещения спеклограммы.

Из сравнения голографического интерферометра [1] и рассматриваемого спекл-интерферометра для контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности следует совершенно разная природа механизмов формирования в них интерференционных картин. Так, в голографическом интерферометре образование интерференционных полос равного наклона, локализующихся как в плоскости голограммы, так и в Фурье-плоскости, обусловлено изменяющимся по радиусу от оптической оси углом наклона субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к спеклам первой экспозиции. При этом за счет пространственной фильтрации дифракционного поля исключается декорреляция спекл-полей двух экспозиций, возникающая из-за неоднородного смещения в плоскости голограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции. В свою очередь в спекл-интерферометре интерференционная картина образуется только за счет неоднородного смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. Причем на стадии воспроизведения спеклограммы необходимо выполнение пространственной фильтрации дифракционного поля, с одной стороны, из-за локализации интерференционных полос в ближней зоне дифракции, с другой, — для увеличения в плоскости регистрации спекл-интерферограммы области, в пределах которой исключается фоновое излучение, обусловленное постоянной составляющей пропускания спеклограммы.

В эксперименте двухэкспозиционные спеклограммы записывались на фотопластинках типа Микрат-ВРЛ с использованием излучения He-Не-лазера, работающего на длине волны 0,6328 мкм. При этом регистрируемое излучение, рассеянное матовым экраном, проходило отрицательную линзу с фокусным расстоянием $f = 220$ мм, диаметром зрачка $d = 11$ мм, находящуюся на расстоянии $l_1 = 160$ мм. Расстояние от линзы до фотопластинки $l_2 = 160$ мм. Диаметр освещенной области матового экрана равнялся 40 мм. Методика экспериментальных исследований заключалась в сравнении результатов записи спеклограмм для фиксированной величины поперечного перемещения рассеивателя $a = (0,025 \pm 0,002)$ мм, причем различные радиусы кривизны расходящейся сферической волны излучения, используемого для освещения матового экрана, выбирались в диапазоне $150 \text{ мм} \leq R \leq \infty$, а для сходящейся сферической волны $200 \text{ мм} \leq R \leq \infty$.

В случае контроля продольного перемещения рассеивателя на величины $\Delta l = (0,5 \pm 0,002)$, $(1 \pm 0,002)$, $(2 \pm 0,002)$ мм радиус кривизны R' расходящейся или сходящейся сферической волн когерентного излучения, используемого для освещения матового экрана, составлял 252,6 мм.

В качестве примера на рис. 5 представлены спекл-интерферограммы, характеризующие поперечное перемещение рассеивателя и зарегистрированные в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием $f_0 = 50$ мм, диаметром зрачка 17 мм.

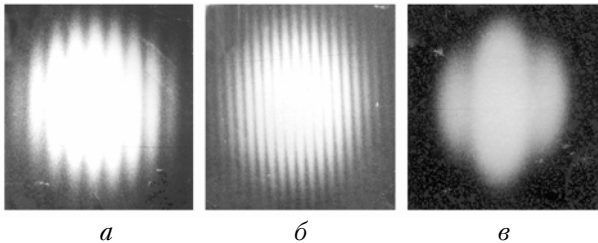


Рис. 5. Спекл-интерференционные картины, характеризующие поперечное перемещение рассеивателя и локализующиеся в Фурье-плоскости, когда на стадии записи спеклограммы матовый экран освещался излучением: *a* — с плоской волной, *б* — сферической расходящейся, *в* — сферической сходящейся

При этом на стадии воспроизведения двухэкспозиционная спеклограмма освещалась коллимированным пучком, диаметр которого равнялся 50 мм. Спекл-интерференционная картина на рис. 5, *a* относится к случаю освещения матового экрана на стадии записи спеклограммы коллимированным пучком, рис. 5, *б* — излучением с расходящейся сферической волной радиусом кривизны $R = 260$ мм, рис. 5, *в* — со сходящейся с $R = 350$ мм. В этих случаях, как и в последующих, связанных с изменением как величины, так и знака радиуса кривизны, проводилось измерение периодов интерференционных полос (помимо того, что их можно определить из результатов измерений R для известных величин λ , a , f , l_1 , l_2 , f_0).

Полученные таким образом значения частоты спекл-интерференционных полос соответствуют рис. 3 с точностью (10%) до ошибки, допускаемой в эксперименте. Причем на стадии воспроизведения двухэкспозиционных спеклограмм, характеризующих поперечное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, отсутствует параллакс интерференционных полос, «замороженных» в Фурье-плоскости, и видимость которых близка к единице из-за малости величины af_0L_0/l_1l_2 по сравнению с радиусом зрачка отрицательной линзы.

При воспроизведении коллимированным пучком двухэкспозиционных спеклограмм, характеризующих продольное перемещение рассеивателя, в ближней зоне дифракции, когда выполняется пространственная фильтрация дифракционного поля с помощью апертурной диафрагмы p_0 (см. рис. 4) диаметром 2 мм, формируются спекл-интерференционные картины, представленные на рис. 6.

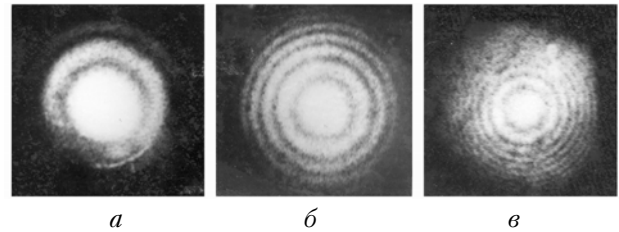


Рис. 6. Спекл-интерференционные картины, локализующиеся в ближней зоне дифракции и характеризующие продольное перемещение диффузно рассеивающий свет плоской поверхности на: *a* — $\Delta l = 0,5$ мм, *б* — $\Delta l = 1$ мм, *в* — $\Delta l = 2$ мм

Причем рис. 6, *a* относится к случаю освещения матового экрана на стадии записи спеклограммы когерентным излучением с расходящейся сферической волной с вышеуказанной величиной радиуса кривизны R' , а рис. 6, *б* и *в* — со сходящейся сферической волной радиусом кривизны R' . Кроме того, на стадии воспроизведения спеклограмм регистрация спекл-интерферограмм на рис. 6 выполнялась с использованием объектива с фокусным расстоянием $f_0 = 50$ мм, для которого предметная плоскость находилась на расстоянии 754 мм ($\tilde{l} + l_3$), а расстояние l_3 равнялось 377 мм. Результаты измерения радиусов колец в соседних порядках интерференции соответствуют величинам $\Delta l = 0,5$ мм (см. рис. 6, *a*), 1 мм (см. рис. 6, *б*), 2 мм (см. рис. 6, *в*) перемещений рассеивателя, рассчитанных на основании выражения $\Delta l = 2\lambda l_1^2 l_2^2 / L_0^2 \mu^2 (r_2^2 - r_1^2)$, где r_1 , r_2 — соответственно радиусы колец в соседних порядках интерференции, которое следует из (16), (17), для коэффициента масштабного преобразования $\mu = 14,1$ с точностью (10%) до ошибки, допускаемой в эксперименте.

Спекл-интерференционная картина на рис. 7, *a* характеризует продольное перемещение рассеивателя на $\Delta l = 1$ мм, регистрация которой выполнялась,

как и регистрация спекл-интерферограммы на рис. 6,б, в плоскости ее локализации.

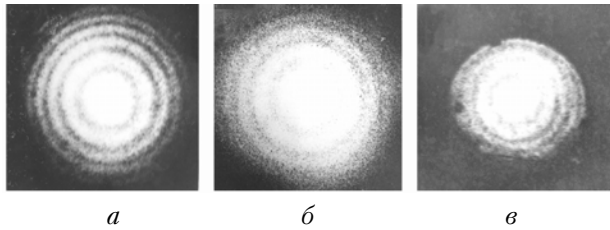


Рис. 7. Распределения освещенности, зарегистрированные: *а – в* плоскости локализации интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, *б, в* – вне плоскости локализации

В свою очередь, когда $l_3 = 150$ мм (рис. 7,б), распределение комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации 3 (см. рис. 4) ближе к распределению, характерному для распределения в дальней зоне дифракции, где отсутствует совпадение идентичных субъективных спеклов двух экспозиций. В случае, когда $l_3 = 600$ мм (рис. 7,в), распределение комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации ближе к распределению, характерному для распределения в плоскости формирования изображения спеклограммы. В обоих случаях – комплексный характер степени корреляции субъективных спекл-полей двух экспозиций, реальная часть которой определяет видность интерференционной картины меньше единицы, а мнимая часть приводит к распределению освещенности в плоскости регистрации, отличному от распределения освещенности, которое имеет место в случае регистрации спекл-интерференционной картины в плоскости ее локализации.

На рис. 8,а (рис. 8,б приведен для сравнения) представлена спекл-интерферограмма, характеризующая продольное перемещение рассеивателя на $\Delta l = 1$ мм.

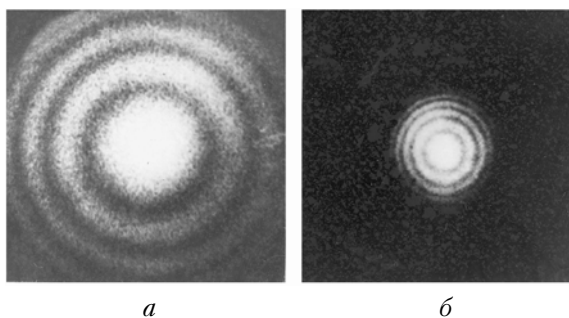


Рис. 8. Спекл-интерференционные картины, характеризующие продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности и зарегистрированные в плоскости ее локализации с помощью объектива с фокусным расстоянием: *а* – $f_0 = 135$ мм, *б* – $f_0 = 50$ мм

Ее регистрация выполнялась с помощью объектива с фокусным расстоянием $f_0 = 135$ мм. Предметная плоскость при регистрации спекл-

интерферограммы находилась на расстоянии 754 мм ($\tilde{l} + l_3$), а расстояние l_3 равнялось 377 мм.

В отличие от рис. 8,б, диаметр фильтрующей дифракционное поле апертурной диафрагмы составлял 4 мм. Кроме того, угол поля зрения объектива ограничивал пространственную протяженность дифракционного гало, следовательно, и спекл-интерференционной картины. Результаты измерения радиусов колец в соседних порядках интерференции и последующий расчет для используемого в эксперименте коэффициента масштабного преобразования $\mu = 4,58$ соответствуют величине $\Delta l = 1$ мм. При этом как для $f_0 = 50$ мм, так и для $f_0 = 135$ мм произведение квадрата коэффициента μ и разности квадратов радиусов колец в соседних порядках интерференции одинаково.

Рис. 9 демонстрирует параллакс интерференционных полос. Для этого регистрировалась с помощью объектива с фокусным расстоянием $f_0 = 135$ мм спекл-интерференционная картина в плоскости ее локализации (рис. 9,а). Затем осуществлялось перемещение спеклограммы в ее плоскости на величину, при которой фаза интерференционной картины на оптической оси изменялась на π (рис. 9,б). Измеренная величина смещения спеклограммы, равная 7,7 мм, соответствует величине, которая следует из выражения (21).

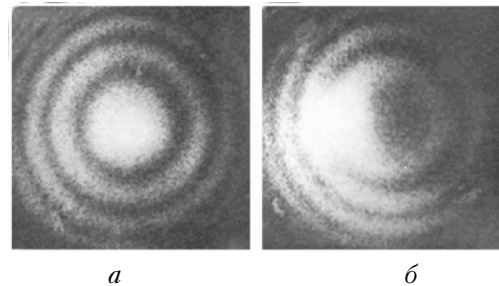


Рис. 9. Спекл-интерференционные картины, демонстрирующие явление параллакса интерференционных полос при несмещенном (*а*) и смещенном (*б*) положениях спеклограммы на стадии ее воспроизведения

Таким образом, результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований показали, что при двухэкспозиционной записи с использованием отрицательной линзы спеклограммы чувствительность спекл-интерферометра к поперечному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности такая же, как чувствительность голографического интерферометра, в котором выполняется регистрация интерференционной картины, локализуемой в Фурье-плоскости. Это объясняется одинаковой природой механизма образования интерференционных картин, связанного с однородным смещением в плоскости голограммы или спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. Отличие состоит в том, что независимо от радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии

записи спеклограммы, в спекл-интерферометре образуются «замороженные» интерференционные полосы с видимостью меньше единицы.

В случае контроля продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности механизм образования высококонтрастной спекл-интерференционной картины, когда на стадии двухэкспозиционной записи рассеиватель освещается когерентным излучением со сферической волной определенной величины ее радиуса кривизны, в спекл-интерферометре в отличие от голографического интерферометра обусловлен только неоднородным смещением в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. При этом чувствительность спекл-интерферометра зависит от коэффициента, определяющего масштаб Фурье-образа комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя в плоскости спеклограммы. В свою очередь, неоднородные смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции приводят к локализации спекл-интерференционной картины в ближней зоне дифракции. Причем положение плоскости локализации спекл-интерференционной картины в ближней зоне дифракции зависит как от коэффициента, определяющего масштаб Фурье-образа комплексной амплитуды пропускания (или отражения) рассеивателя в плоскости спеклограммы, так и радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. Кроме того,

локализация спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение рассеивателя, в ближней зоне дифракции сопровождается явлением параллакса, т.е. наблюдением «живых» интерференционных полос.

1. Гусев В.Г. Формирование в диффузно рассеянных полях интерференционных картин при проведении пространственной фильтрации дифракционного поля двухэкспозиционных квази-Фурье и Фурье-голограмм. Часть I // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 5. С. 455–464.
2. Гудмен Д. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 360 с.
3. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация голографических интерферограмм бокового сдвига // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 69. Вып. 5. С. 1125–1128.
4. Motoki Yonemura. Holographic measurement of in-plane deformation using fringing visibility // Optik. 1983. V. 63. N 2. P. 167–177.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 497 с.
6. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация интерферограмм бокового сдвига // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. Вып. 6. С. 1201–1206.
7. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 158 с.
8. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация голографических интерферограмм бокового сдвига // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. Вып. 3. С. 51–55.
9. Гусев В.Г. Пространственная фильтрация диффузно рассеянных полей при получении голографических интерферограмм бокового сдвига // Оптический журнал. 1993. № 1. С. 9–12.
10. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 320 с.

V.G. Gusev. Formation of speckle interference fringes for the determination of transversal or longitudinal displacements of surface diffusively scattering light. Part I.

Analysis of sensitivity of the speckle interferometer to transversal or longitudinal displacements of plate surface diffusively scattering light is presented when a negative lens is used to record the specklegram. It is shown that the sensitivity of the interferometer to transversal displacement is defined by the radius of curvature of the spherical wave of radiation illuminating the surface. The sensitivity of the interferometer to longitudinal displacement is defined by the scale of Fourier-transform function, determined the complex amplitude the reflection or the transmission of the surface scattering light. The experimental results are in agreement with theoretical arguments.